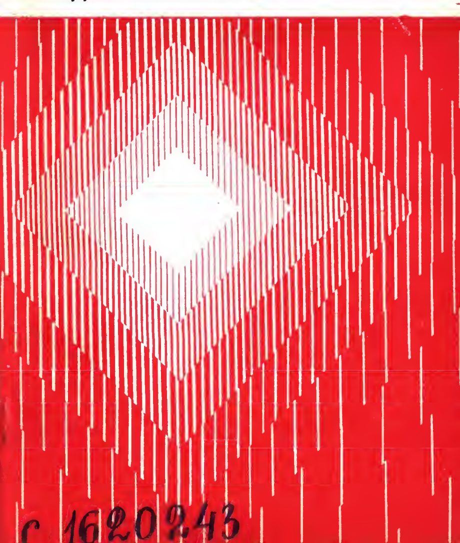
НАУКА-СТРОИТЕЛЬНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Э. А. Валюков, И. З. Волчек

ПРОИЗВОДСТВО АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ



КПК Зак 2298 Тир. 80 млн

НАУКА — СТРОИТЕЛЬНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Э. А. ВАЛЮКОВ, И. З. ВОЛЧЕК,
кандидаты техн. наук

ПРОИЗВОДСТВО АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1975

УДК 666.961.033

Печатается по решению секции литературы по технологии строительных материалов редакционного совета Стройиздата от 23 апреля 1971 г.

Валюков Э. А., Волчек И. З. Производство асбестоцементных изделий методом экструзии. М., Стройиздат, 1975. 112 с. (Наука — строит. производству).

В книге обобщены сведения о новом технологическом способе изготовления асбестоцементных изделий методом экструзии. Приведены результаты исследований, разработки и экспериментальной проверки экструзионной технологии изготовления асбестоцементных изделий, выполненных в НИИАсбестцементе.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников промышленности строительных материалов.

Табл. 30, рис. 46, список лит.: 119 назв.

В $\frac{30209-449}{047(01)-75}$ 251—75

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наличие в нашей стране богатейших месторождений асбеста и высокоразвитого цементного производства позволяет планировать дальнейшее значительное увеличение выпуска асбестоцементных изделий.

Изготовление асбестоцементных изделий на отечественных предприятиях и за рубежом осуществляется в основном по круглосеточному способу производства. Этот способ обеспечивает получение высококачественных материалов. Однако ассортимент их ограничен листовыми изделиями и трубами. Между тем дальнейшая индустриализация строительства и необходимость снижения массы зданий и сооружений требуют создания из асбестоцемента крупноразмерных плит, панелей и других изделий полной заводской готовности. В связи с этим в последние годы стали уделять внимание разработке новых способов формования асбестоцементных изделий.

Некоторое распространение получили способы формования вакуум-насасыванием и инжекцией. Этими методами стало возможным изготовлять фасонные комплектующие детали к листам и трубам. Изделия эти, однако, имеют ограниченную длину, а сам способ изготовления, как и круглосеточный, является прерывным.

Получение асбестоцементных погонажных изделий, в том числе изделий сложной конфигурации и, наконец, изделий типа пустотелых плит и панелей, возможно способом экструзии. Этот способ состоит в том, что сырьевую смесь, обладающую определенной пластичностью, под воздействием усилий шнека или поршня выдавливают из пресса через мундштук. В результате получают изделия, форма которых соответствует профилю мундштука.

В ряде стран такому методу в последнее время стали уделять значительное внимание. В СССР этот новый технологический процесс разрабатывается в институте НИИАсбестцемент.

В настоящей книге приводятся данные о состоянии разработки и освоения экструзионной технологии асбестоцементных изделий в нашей стране и за рубежом.

Авторы выражают искреннюю благодарность товарищам, которые оказали большую помощь при разработке и экспериментальном освоении экструзионной технологии изготовления асбестоцементных изделий — сотрудникам института НИИАсбестцемент, Опытно-производственного предприятия и Белгородского комбината асбестоцементных изделий.

1* Зак. 358

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ АСБЕСТОЦЕМЕНТА

1. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Основными видами асбестоцементных изделий являются листы и трубы, которые широко используются в строительстве. Такой ассортимент обусловлен в значительной степени способом их производства на круглосеточных листо- и трубоформовочных машинах [4, 13, 73, 79, 84].

Принцип получения асбестоцемента на указанных машинах заимствован из бумажной и картоноделательной промышленности более 50 лет назад. Он состоит в том, что асбестоцемент получают из низкоконцентрированных асбестоцементных суспензий (8—14%), которые на круглосеточных машинах фильтруют с последующим вакуумированием и уплотнением.

Многолетний опыт получения асбестоцементных изделий на круглосеточных машинах привел к его значительному усовершенствованию. В результате асбестоцементные изделия, полученные этим методом, имеют высокие физико-механические показатели, а используемое оборудование обеспечивает значительную производительность [20]. Это основное достоинство рассматриваемой технологии обеспечило ее широкое использование в мировой практике. Вместе с тем советские и зарубежные исследователи продолжают работы по ее усовершенствованию с целью дальнейшего улучшения качества получаемых изделий и повышения производительности оборудования.

Высокое качество асбестоцементных изделий, получаемых на круглосеточных машинах, обусловлено прежде всего эффективным использованием армирующих свойств асбеста, это достигается мокрой распушкой асбеста и тщательным смешиваним асбеста с цементом при избытке воды. Вторым фактором, который способствует получению изделий с высокими прочностными показателями, является плоскостная ориентация асбеста в изделиях.

Известно, что эффективное использование волокон асбеста в асбестоцементе зависит от их расположения по отношению к возникающим напряжениям. Этот вопрос подробно рассмотрен проф. П. Н. Соколовым [79], Л. С. Зевиным и И. М. Фланцбаум [42], которые показали, что коэффициент использования асбеста ($K_и$) связан со степенью ориентации волокон следующей зависимостью:

$$K_и = P\left(0{,}22 + 0{,}41\ \frac{1}{1+\frac{n}{m}}\right), \qquad (1)$$

где P — коэффициент, учитывающий отклонение волокон от плоскости первичного слоя; m — доля волокон по массе, ориентированных параллельно линии действия растягивающей силы; n — доля волокон по массе, ориентированных перпендикулярно линии действия растягивающей силы.

При совпадении растягивающих асбестоцемент сил с направлением преимущественной ориентации волокон асбеста коэффициент $K_и$ составляет для труб — 0,415; для листов — 0,345.

При отсутствии преимущественной ориентации в плоскости слоя коэффициент использования их армирующих свойств равен: для труб — 0,35 и для листов — 0,32.

Способ производства асбестоцементных изделий на круглосеточных машинах обеспечивает повышенный коэффициент использования армирующих свойств асбеста по сравнению с асбестоцементом, получаемым такими способами, при которых волокна асбеста расположены хаотически (методы инжекции, полусухого формования и др.). Для последних коэффициент использования волокон асбеста $K_и=0{,}25$, т. е. уменьшается на 60% для труб и на 38% для листовых изделий.

Однако анализ существующей технологии говорит о том, что она не лишена ряда недостатков. Прежде всего следует отметить, что на первой стадии технологического процесса используется весьма большое количество воды, которая нужна для распушки асбеста, смешивания его с цементом и для обеспечения фильтрации. В дальнейшем технологический процесс на листо- и трубоформовочных машинах сводится к удалению избыточного содержания воды из асбестоцементной массы, т. е. к повышению твердоводного отношения с 0,06 до 3.

Наличие в исходной смеси большого количества воды, часть которой связана достаточно прочно, затруд-

няет уплотнение материала и ограничивает получение изделий, обладающих высокой плотностью и прочностью.

Особенностью традиционной технологии является и то, что получаемые изделия имеют слоистую структуру, причем прилегающие друг к другу слои вследствие особенности процесса фильтрации обеднены цементом [13]. В результате прочность изделия на разрыв перпендикулярно расположению слоев в 8—10 раз ниже прочности материала вдоль слоя. Это приводит к тому, что разрушение листовых изделий от морозной агрессии начинается, как правило, с расслоения.

Основным недостатком рассматриваемой технологии является сравнительно ограниченный ассортимент выпускаемых изделий.

Одним из способов, позволяющих расширить ассортимент выпускаемой продукции, является способ полусухого формования, разработанный ВНИИСтроммашем, НИИАсбестцементом и Краматорским шиферным заводом [22, 23, 59]. Сущность его заключается в том, что асбестоцементные смеси с низкой исходной влажностью (10—15%) подвергаются прокату под давлением до $200 \cdot 10^5$ Па. По сравнению с известным способом получения плоских асбестоцементных листов он имеет ряд преимуществ. К ним, в частности, относится возможность получения изделий с достаточно высокой механической прочностью на асбестах низких сортов. Проектная часовая производительность технологической линии составила 10 тыс. усл. плиток, что примерно в два раза выше производительности обычных листоформовочных машин. Это оборудование обеспечивает непрерывный процесс производства и легко поддается автоматизации. Вследствие того что исходная влажность асбестоцементных смесей низка, отпадает необходимость в рекуперационных устройствах. Листы, получаемые из полусухих смесей, при использовании асбеста 6-го сорта имели предел прочности при изгибе 180—$200 \cdot 10^5$ Па, а объемную массу более 1850 кг/м³. По этому способу можно изготовлять только плоские листы, поскольку полуфабрикат с низкой влажностью не поддается профилированию. Использование асбеста низких сортов хотя и приводит к удешевлению продукции, однако не обеспечивает необходимой ударной вязкости.

Другим новым способом производства асбестоцементных листовых изделий является формование ли-

стов из концентрированных суспензий путем их вакуум-обезвоживания с одновременной прокаткой и профилированием на технологической линии фирмы «Маньяни». Этот способ и оборудование освоены на воскресенском комбинате «Красный строитель» [5, 71]. Достоинством рассматриваемого способа является совмещение процесса формования листа с его профилированием. Он также обеспечивает непрерывность процесса производства и возможность получения листов с профилем переменной толщины, что позволяет обеспечить плотное стыкование листов в кровельном покрытии. Вместе с тем способ, предусмотренный в линии «Маньяни», ограничен производством только листовых изделий, хотя в принципе может быть использован и для получения изделий различного профиля. Как показал опыт эксплуатации линии «Маньяни», она требует применения специальных уплотняющих материалов и смазок, производительность линии ниже производительности освоенных промышленностью круглосеточных машин СМ-942 и СМ-943, а физико-механические показатели листов, полученные на линии «Маньяни», также уступают показателям листов, изготовляемых на круглосеточных машинах.

В последние годы разработаны и осуществлены другие новые способы производства листовых изделий, а также изделий более сложной конфигурации [54, 55, 92, 93, 94]. Одним из таких способов является метод вакуум-фильтрации и упругого уплотнения. Сущность способа состоит в том, что асбестоцементный слой образуется в результате вакуум-фильтрации асбестоцементной суспензии, а затем подвергается гидростатическому упругому уплотнению. Этот способ осуществлен на Белгородском комбинате асбестоцементных изделий для производства кровельной черепицы, так называемой тосканской плитки.

Наконец, следует остановиться на производстве асбестоцементных изделий способом инжекции. Он представляет особый интерес, поскольку его применение позволяет получить изделия сложной конфигурации, которые другими методами получить практически невозможно (коньковые детали, фасонные детали к трубам, раструбные трубы и др.). Инжекционный способ разработан итальянской фирмой «Jsprа», и принцип его состоит в том, что асбестоцементную суспензию под давлением нагнетают в камеру, представляющую собой

форму изделия и ограниченную с одной стороны сеткой для отвода воды, а с другой — резиновой подушкой, в которой затем при давлении до 8 МПа производится прессование изделия. Использование способа инжекции позволяет существенно расширить ассортимент изделий, выпускаемых асбестоцементной промышленностью. Однако имеются и некоторые недостатки этого метода. К ним, в частности, относится необходимость весьма тщательного ухода за сетками, которые могут сравнительно быстро забиваться и вызывать тем самым простои оборудования.

Как видно из приведенного обзора, каждый из рассмотренных способов производства асбестоцементных изделий имеет свои достоинства и недостатки и не может считаться универсальным. Их объективная оценка должна позволить использовать каждый из них наиболее целесообразно. Таким образом, за исключением способа инжекции, все рассмотренные новые технологические способы позволяют получать, как правило, только листовые изделия, а принципиально новых видов изделий изготовлять нельзя.

2. ЭКСТРУЗИОННЫЙ СПОСОБ ФОРМОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

В последние годы в производстве асбестоцементных изделий стали уделять внимание способу экструзии.

Известно, что экструзия широко применяется в ряде областей производства строительных и других материалов. В течение многих лет она применяется для изготовления изделий из керамики, пластмасс и древесного волокна.

Экструзионную технологию в последнее время стали использовать для получения изделий из металла. Делаются попытки получения способом экструзии бетонных и железобетонных изделий.

Экструзионное оборудование применяется также для получения брикетов из торфа, угля и других материалов. Способ экструзии, или, как его также называют, способ выдавливания, имеет ряд достоинств. Среди них следует отметить непрерывность процесса производства, возможность получения изделий различной, в том числе весьма сложной конфигурации и с достаточно точными размерами, высокую производительность формо-

вочного оборудования. Наиболее глубоко процесс экструзии изучен и хорошо освоен в производстве изделий из керамики и пластмасс [82, 83, 57, 77, 45, 18, 46, 67, 86]. Этот опыт в полной мере должен быть использован и при разработке экструзионного способа производства асбестоцементных изделий.

Ряд работ посвящен процессам экструзии древесноволокнистых масс [63, 64] и экструзии металлов [15, 37].

Для получения изделий из бетона способом экструзии было создано различное экспериментальное оборудование и выполнен ряд исследований [60, 68, 72]. Однако проблема получения экструзионного бетона оказалась весьма сложной и пока не привела к его широкому промышленному освоению.

Применительно к асбестоцементу способ экструзии позволяет:

расширить ассортимент асбестоцементных изделий за счет изделий сложной конфигурации (типа пустотных панелей, плит и др.);

изготовлять изделия значительной длины, которая лимитируется только конструкцией приемных устройств и удобствами транспортирования и их применения;

осуществлять непрерывный технологический процесс, что определяет высокую производительность формовочного оборудования;

механизировать и автоматизировать в значительной степени процесс производства;

использовать в качестве вяжущего наряду с портландцементом цементы с добавками, а также различные ускорители твердения, пластификаторы и другие вещества, придающие специфические свойства готовым изделиям;

наряду с асбестом использовать другие армирующие цементный камень волокна, в том числе искусственные минеральные и органические волокна.

3. РАЗВИТИЕ ЭКСТРУЗИОННОГО СПОСОБА ФОРМОВАНИЯ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Сведения о попытках использовать экструзионный принцип формования для получения асбестоцементных изделий относится еще к 1939 г. [95].

В 1944 и 1946 гг. в США были выданы патенты на устройство для экструдирования асбестоцементных труб

[96, 97]. Оба эти патента предлагают конструкции дорнов шнековых прессов, применение которых должно облегчить процесс экструзии асбестоцемента.

Использование для формования асбестоцементных труб ленточных прессов предусматривалось патентом, выданным в Англии в 1947 г. [98]. Согласно этому патенту в асбестоцементную смесь предлагается вводить от 0,01 до 0,05% пластификатора к массе цемента. В качестве пластификаторов рекомендовалось использовать гидрофобные масла нефтяного и каменноугольного происхождения, а также смолу хвойного дерева. По данным патента эти добавки повышают у готовых изделий прочность на изгиб, а также снижают пористость труб. Указанные добавки могут вводиться методом пульверизации непосредственно на асбестоцементную массу либо в порошкообразном виде к цементу во время помола последнего или же в растворе акустической соды в воду, идущую для затворения.

Примерный состав смеси: цемента 169 кг, асбеста 50 кг, кремнезема 150, пластификатора 0,34—0,68 кг. Патентом США 1948 г. предлагается изготовление асбестоцементных труб нагнетанием асбестоцементной массы в перфорированную форму, в которой образуется изделие заданных форм и размеров. При таком способе изготовления хотя и используется соответствующее формовочное оборудование, однако его нельзя причислить к экструзии, поскольку он не обеспечивает непрерывного процесса производства [99].

Несмотря на наличие ряда патентов до середины 60-х годов не было сделано сколь-нибудь серьезных попыток организовать изготовление асбестоцементных изделий способом экструзии.

В 1965 г. в СССР было выдано авторское свидетельство на способ (заявлен в 1962 г.) изготовления асбестоцементных труб способом экструзии в установке непрерывного действия [24].

Особенностью этого способа является то, что в процессе формования труб асбестоцементная масса подвергается вращению, чем обеспечивается ориентация асбеста, способствующая повышению качества готовых изделий.

Значительный шаг в создании экструзионной технологии производства асбестоцементных изделий был сделан после получения фирмой «Iohns—Manville» в 1965 г.

патента на создание асбестоцементных композиций, предназначенных для получения изделий способом экструзии. Этот способ был запатентован в Англии, Австралии и некоторых других странах [100, 101, 102].

На этом патенте следует остановиться более подробно. Основной особенностью метода, изложенного в патенте фирмы «Iohns—Manville», является использование для улучшения процесса формования специальных химических добавок, названных гидромодификаторами. Роль гидромодификаторов состоит, с одной стороны, в придании асбестоцементным смесям повышенной пластичности. С другой стороны, их использование предотвращает водоотделение при уплотнении асбестоцементных масс, что позволяет вводить в состав асбестоцемента значительное количество воды. В результате использования гидромодификаторов можно получать асбестоцемент с плотностью и прочностью в широком диапазоне.

В качестве гидромодификаторов рекомендуется целый ряд веществ, среди которых метилцеллюлоза, гидроксил-пропоксил-метилцеллюлоза, полиоксиэтилен, карбоксил-метил-гидроксил-этилцеллюлоза, эфиргидроксилэтилцеллюлоза и др.

Составы, предназначенные для экструзии, рекомендуются патентом в весьма широком диапазоне (%):

цемент	10—85
вода	14—50
гидромодификатор	0,05—10
асбестовое волокно	3—60
вспомогательный цементирующий агент (кварцевый песок)	0—55
другие инградиенты, входящие в обычные композиции с гидравлическим вяжущим	0—55

По сведениям, приведенным в патенте, асбестоцемент, полученный способом экструзии, имел следующие физико-механические показатели (средние):

предел прочности при изгибе — $283 \cdot 10^5$ Па;

объемная масса — 1600 кг/м³.

Эти данные были получены при испытании образцов-плиток длиной 20 см, изготовленных на поршневом прессе при использовании в качестве модификатора гидроксил-пропоксил-метилцеллюлозы и при следующем составе асбестоцемента (в % по массе):

портландцемент — 50, асбест — 20 (качество асбеста не указано); кварцевый песок — 30.

Влажность массы, подвергнутой экструзии, составляла 25%.

После прессования образцы сутки выдерживали во влажной камере, а затем в течение 16 ч подвергали твердению в автоклаве при давлении пара $7 \cdot 10^5$ Па.

Патентом США, опубликованным в 1965 г. и запатентованным во Франции, предлагается способ обработки асбестового волокна [103] гидромодификаторами. Приготовление формовочной композиции предусмотрено на основе асбестового волокна, пропитанного гидромодификатором, равномерно распределенным по всему объему смеси. Особенность этого патента состоит в том, что гидромодификатором опыляют асбестовые волокна, находящиеся во взвешенном состоянии (в воздушном потоке).

Следует подчеркнуть, что в СССР еще в 1950 г. выдано авторское свидетельство на способ и устройство для изготовления теплоизоляционных волокнистых материалов, особенностью которого является смешивание волокон со смолами в момент нахождения их во взвешенном состоянии [33]. Способ, изложенный в американском патенте 3271186, не отличается принципиально от способа, предложенного в СССР.

В ФРГ в 1965 г. предложен способ получения асбестоцементных изделий в поршневых прессах путем уплотнения предварительно изготовленного полуфабриката в виде блоков. В предложении отмечается, что для получения изделий используются смеси из волокнистых и связующих материалов с низким содержанием воды, подвергнутой при первичной обработке дезаэрации и пластифицированию под вакуумом. Для повышения формуемости смесей применяются пластификаторы, представляющие собой металлические мыла или алкоголи либо их сульфокислоты [104].

В последующем появились патенты, в которых предлагается целый ряд веществ, вводимых в асбестоцемент для его пластификации. Так, например, английский патент [105] предусматривает использование в качестве пластификаторов нерастворимые соединения, содержащие от 14 до 20 атомов углерода, в составе которых имеются жирные кислоты, ангидриды, амиды и эфиры жирных кислот и др. Пластификатор добавляется к

другим компонентам в количестве от 0,1 до 5% к массе сухих составляющих.

В качестве примера приводится асбестоцементная смесь, состоящая из 40 кг канадского асбеста 7-го сорта, 142 кг портландцемента и 2 кг олеина, включающего по массе 74% олеиновой кислоты. Сухую смесь перемешивают в течение 5 мин, а затем в нее вводят 64 кг воды. Из полученной таким образом асбестоцементной массы на шнековом экструдере были получены трубы с разрывном давлением $160 \cdot 10^5$ Па с водопоглощением 16,5%.

По мнению английских специалистов экструзионному способу производства асбестоцементных изделий принадлежит большое будущее в строительной индустрии [87].

В последние годы появился еще ряд патентов на составы смесей, предназначенные для экструзии.

Так, патентом Австрии [106] предлагаются смеси, в составе которых наряду с асбестом, цементом и тонкомолотым песком используются в значительных количествах эпоксидные и полиэфирные смолы. Полученные на основании этих составов изделия твердеют в автоклавах. Один из рекомендованных составов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав асбопластического материала для экструзии

Состав	Масса частей	%
Портландцемент	80	36,2
Тонкомолотый песок	80	36,2
Асбест	5	2,2
Жидкая эпоксидная смола	15	6,8
Триэтилентетрамин	2,1	0,95
Дидромкрезигмецидилэфир	3	1,4
Метилгидроксилпропилцеллюлоза	2	0,9
Вода	34	15,4

Как видно из данных таблицы, содержание асбеста в смеси весьма невелико, и, строго говоря, этот состав не может быть отнесен к асбестоцементу, учитывая тем более значительное содержание в нем эпоксидной или полиэфирной смолы. Имеются некоторые данные о качестве используемого асбеста при изготовлении асбестоцементных изделий способом экструзии.

В проспекте компании «Iohns—Manville» [112] отмечается, что для асбестоцементных панелей, изготовляемых способом экструзии, используется синтетическое кальциево-алюмосиликатное вяжущее, армированное отборным асбестовым волокном.

Вместе с тем имеются сведения о том, что при изготовлении экструзионного асбестоцемента применяется и низкосортный асбест [91]. Однако в этом случае количество используемого асбеста достигает 50—60 ч. по массе на 100 ч. по массе цемента.

Патентами США [108, 109] регламентируется способ увлажнения асбестоцементных смесей при их подготовке. По одному из них асбест и цемент перемешивают в сухом виде в бегунах, затем добавляют воду в течение 60 с, после чего перемешивание продолжается еще до 60 с. В этом же патенте указывается, что в смеси содержится от 13 до 48 частей асбеста по массе на 100 частей цемента по массе. По второму способу воду рекомендуется добавлять в два этапа. Первоначально вводят 60—95% воды от ее общего количества, и смесь интенсивно перемешивают в течение 2 мин, после чего добавляют остальную воду и смесь перемешивают еще не более 20 с. При этом асбестоцементная масса приготовляется в бегунах. Предлагаемые патентами составы асбестоцементных смесей для экструзии, как правило, содержат тонкомолотый кварцевый песок, что предполагает автоклавное твердение получаемых изделий. Однако в некоторых из них указывается и о возможности получения изделий только на портландцементе. Для ускорения предварительного твердения асбестоцементных труб, выходящих из экструдера, патентом США [110] предлагается обрабатывать их углекислым газом. Патентом США [111] предусматривается введение в состав асбестоцементной массы, предназначенной для экструзии некоторого количества растительного (древесного) волокна. Оно используется для предотвращения возможного растрескивания изделий, которые подвергаются значительному нагреву в процессе экструзии.

Как видно из приведенного обзора, способу экструзии в производстве асбестоцементных изделий начинают уделять серьезное внимание, считая его достаточно перспективным. В нашей стране способ экструзии начал разрабатываться примерно в то же время, что и за ру-

бежом, а публикации о нем появились только в последние годы. Вместе с тем как в патентных, так и в рекламных зарубежных материалах отсутствуют сведения, необходимые для создания научно-технических основ экструзионной технологии и соответствующего оборудования для нее. Все это лишало возможности использовать зарубежный опыт и потребовало специальных исследований. При их осуществлении наиболее целесообразно базироваться, с одной стороны, на опыте керамической промышленности по экструзии глиняных дисперсных масс и с другой — на результатах поисковых работ. Поисковые экспериментальные работы осуществлялись на лабораторной установке, в основе которой был использован пресс М-2 (ГОСТ 7411—55) модель 764 с диаметром шнека 70 мм и числом оборотов шнекового вала 30 в минуту. Установленная мощность 2,8 кВт. На этой установке получены изделия с наружным диаметром до 65 мм.

Для обеспечения процесса экструзии пресс был оснащен мундштуком специальной конструкции для получения трубы с внутренним диаметром 50 мм и толщиной стенки 5—7 мм. Трубы изготовляли на асбесте М-60-30 сухой распушки (степень распушки 25%). Асбестоцементная масса содержала 15% асбеста и 85% цемента марки 400 Воскресенского цементного завода. Влажность массы составляла 20—25%. Асбестоцементную смесь приготовляли следующим образом. Асбест смешивали всухую с цементом, а затем смесь увлажняли заданным количеством воды и снова перемешивали до получения однородной массы.

Готовую асбестоцементную смесь загружали в работающий пресс по возможности равномерно. По выходе из пресса изделия твердели в естественных условиях в течение 16—18 ч, а затем пропаривались в течение 4—5 ч при температуре 60—80°С. После пропаривания трубы до испытания хранили в воде, потом их разрезали на образцы длиной от 10 до 30 см, которые испытывали на раздавливание и на водонепроницаемость под действием внутреннего гидравлического давления.

Испытания показали, что на асбесте 6-го сорта были получены трубы с разрывным давлением до 1,1 МПа, пределом прочности при разрыве до $44 \cdot 10^5$ Па и пределом прочности при раздавливании до $315 \cdot 10^5$ Па. Объ-

емная масса образцов достигала 2000 кг/м³, а водопоглощение составило 8,6%.

Анализ полученных данных показал принципиальную возможность экструдирования асбестоцементных смесей и получения изделий с качественными показателями, соответствующими требованиям, предъявляемым к таким трубам, как керамические, бетонные и железобетонные. Следует вместе с тем подчеркнуть, что полученные изделия изготовляли на низкосортном асбесте и без использования пластификаторов.

Для установления принципиальной возможности получения способом экструзии изделий сложной конфигурации были осуществлены экспериментальные работы на ленточном прессе ЛВП-4 с диаметром шнека 300 мм опытного завода НИИСтройкерамики. Несмотря на то, что использованный пресс не был приспособлен для получения изделий из асбестоцемента, а подготовка сырьевых асбестоцементных смесей производилась на примитивном оборудовании, тем не менее были получены изделия в виде коробов, а также двух- и трехпустотных блоков, являющихся прообразом будущих панелей.

Полученные результаты послужили основанием для продолжения и расширения исследований по созданию экструзионной технологии асбестоцемента. Вместе с тем приобретенный опыт показал, что для экструдирования асбестоцемента необходимо создание специального технологического оборудования, которое в свою очередь требует знания ряда специфических свойств асбестоцементных смесей, предназначенных для экструзии.

ГЛАВА II

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

1. НОМЕНКЛАТУРА АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ ЭКСТРУЗИИ, И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Как отмечалось выше, экструзионная технология позволяет получать асбестоцементные изделия довольно широкой номенклатуры и сложной конфигурации.

Некоторые образцы таких изделий, полученных авторами, представлены на рис. 1. Помимо них на экспери-

ментальных установках освоено изготовление асбестоцементных изделий типа швеллеров, предназначенных для сборки асбестоцементных панелей (рис. 2, 3). Асбестоцементные панели размером 3×1,5 м, собранные из

Рис. 1. Образцы асбестоцементных изделий, полученных способом экструзии

обычных асбестоцементных листов и четырех экструзионных швеллеров (высота швеллера 13 см), выдержали при испытании на равномерно распределенную нагрузку более 7500 Н/м² при нормативной нагрузке 4000 Н/м² (панели испытывали на пролете 3 м).

В ряде зарубежных стран, как можно судить по проспектным и рекламным материалам, начато изготовление экструзионного асбестоцемента широкой номенклатуры. Американская фирма «Iohns-Manville» сообщает об освоении производства нескольких типов асбестоцементных изделий способом экструзии. Условно этот процесс назван A. C. E. (Asbestos Cement Extrusion [112. 113, 114].

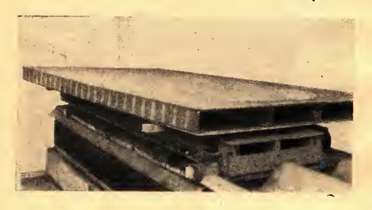
Изделия изготовляют в основном двух типов.

Первый тип изделий представляет многопустотные панели шириной до 60 см и длиной до 4,5 м. Толщина таких панелей колеблется от 38 до 120 мм.

Панели шириной 60 см имеют 7 прямоугольных отверстий, толщина стенок составляет примерно 8—10 мм.

Рис. 2. Асбестоцементные швеллеры, полученные способом экструзии

Рис. 3. Асбестоцементная панель, собранная на экструзионных швеллерах



На рис. 4 представлены сечения некоторых типов таких панелей. Они предназначаются в качестве ограждающих навесных панелей, панелей перекрытий и др. Панели этого типа на торцах имеют выступы и пазы для крепления их между собой встык.

Второй тип панелей представляет либо сплошную плиту, либо плиту с небольшими отверстиями. Такие панели имеют самую различную конфигурацию поверхности и фактуру и предназначаются в качестве отделочного материала кирпичных, бетонных и других стен. Применяют их также в сочетании и с другими строительными материалами. Ширина плит до 60 см, длина до 4,5 м и толщина от 19 до 70 мм (рис. 5). Фирмой раз-

работаны методы крепления таких панелей и плит для различных условий применения.

По лицензии, приобретенной у американской фирмы «Iohns-Manville» экструзионные изделия начали изготовлять в некоторых европейских странах, а также в Японии.

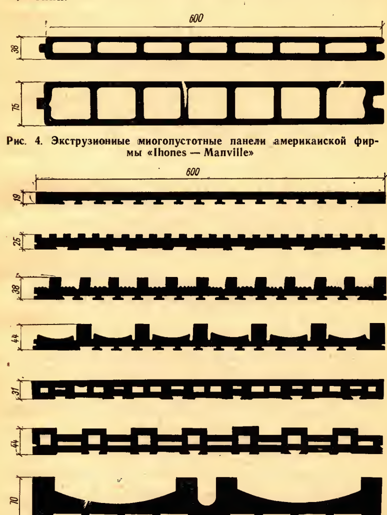


Рис. 4. Экструзионные миогопустотные панели американской фирмы «Ihones — Manville»

Рнс. 5. Типы экструзиоиных плит для отделки фасадов здаиий и сооружеиий фирмы «Ihones — Manville»

Европейская фирма «Eternit» рекламирует производство новых асбестоцементных изделий типа А. С. Е., изготовляемых способом экструзии [115]. Наряду с многопустотными панелями, анологичными тем, которые приводятся в американских патентах, сообщается об изготовлении изделий, предназначенных в качестве подоконных досок, отделки карнизов и других деталей кровельных покрытий.

Некоторые типы таких изделий представлены на рис. 6.

По сообщению швейцарских источников английская фирма «The Universal Asbestos Manufacturing Co Ltd» [116, 119] изготовляет из экструзионного асбестоцемента стеновые панели, подоконники, фасадные облицовочные плиты и др.

Японская фирма «Nadsavi» изготовляет экструзионные асбестоцементные панели различной формы и толщины, которые также по размерам близки к изделиям,

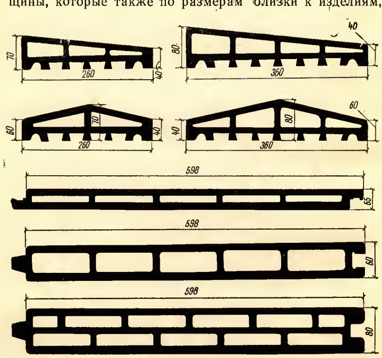


Рис. 6. Изделия фирмы «Eternit», полученные методом экструзии. Размеры даны в мм

изготовляемым фирмой «Iohns — Manville». Они предназначаются для применения в качестве облицовки наружных и внутренних стен, для кровельных покрытий и междуэтажных перекрытий и др. [117].

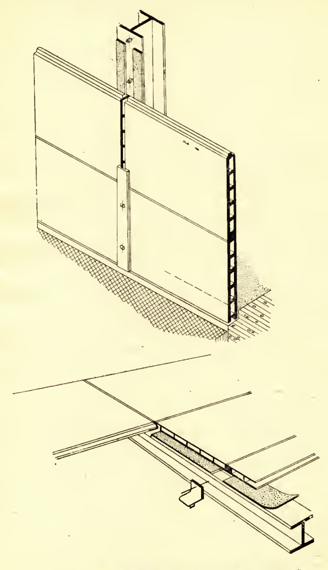


Рис. 7. Схема применения экструзионных панелей

Некоторые примеры применения многопустотных асбестоцементных экструзионных панелей, заимствованные из зарубежных патентов, представлены на рис. 7. Имеющиеся сведения не дают достаточного представления об объемах производства экструзионного асбестоцемента и масштабах его применения в настоящее время. Можно предположить, что они пока сравнительно невелики. Вместе с тем повсеместный интерес к новому способу производства и его возможности дают основание полагать, что в предстоящие годы экструзионная технология производства асбестоцементных изделий получит значительное развитие.

2. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ ЭКСТРУЗИИ

Физико-технические показатели экструзионного асбестоцемента и изделий из него, приводимые в зарубежных источниках, весьма различны и колеблются в значительных пределах. Связано это, видимо, с особенностями технологии и методами испытания изделий и материала. В американском патенте приводятся данные о прочностных свойствах изделий, получаемых из экструзионного асбестоцемента [100]. Трехпустотные блоки с круглыми отверстиями шириной 300 мм и высотой 106 мм (диаметр каждого отверстия 87 мм) имели предел прочности при изгибе в среднем $115 \cdot 10^5$ Па. В нем же отмечается возможность получения изделий с плотностью от 700 до 1850 кг/м³. В проспектах американской компании «Iohns — Manville» [113, 114] приводятся физико-механические показатели облицовочных плит и многопустотных панелей, изготовленных способом экструзии, профили которых приведены на рис. 4 и 5 (табл. 2).

В проспекте фирмы «The Universal Asbestos Manufacturing Co Ltd» приводятся сведения о физико-механических показателях асбестоцементных изделий, получаемых способом экструзии [116].

Панели, предназначенные для облицовки фасадов зданий типа А. С. Е. и представляющие собой сплошной рифленый лист, имеют предел прочности при изгибе $120—130 \cdot 10^5$ Па. Плоские листы, изготовляемые экструзией и предназначенные для внутренней и наружной облицовки, имеют предел прочности при изгибе от 140 до

Таблица 2. Физико-технические показатели асбестоцементных экструзионных облицовочных плит и многопустотных панелей фирмы «Iohns—Manville»

Показатели	Плоская облицовочная плита толщиной в мм			Многопустотная панель толщиной в мм	
	19	25	38	38	75
Предел прочности при изгибе в Па	$176 \cdot 10^5$	$211 \cdot 10^5$	$211 \cdot 10^5$	$141 \cdot 10^5$	$141 \cdot 10^5$
Предел прочности при растяжении в Па	$85 \cdot 10^5$	$85 \cdot 10^5$	$85 \cdot 10^5$	$85 \cdot 10^5$	$85 \cdot 10^5$
Момент сопротивления в м³	$43 \cdot 10^{-6}$	$59 \cdot 10^{-6}$	$156 \cdot 10^{-6}$	$253 \cdot 10^{-6}$	$640 \cdot 10^{-6}$
Допускаемый пролет в м	1,5	1,8	3	3,3	4,5
Объемная масса в кг/м³	1600	1600	1600	1600	1600
Разрушающая равномерно распределенная нагрузка в Н/м²	2900	3500	4100	4400	6100

$180 \cdot 10^5$ Па, а плотность 1650—1680 кг/м³; толщина их от 18 до 50 мм.

Кровельные панели (плиты) марки А. С. Е. изготовляют в виде пустотелых элементов общей толщиной 50 и 80 мм и шириной 600 мм. Физико-механические показатели и несущая способность панелей по данным фирмы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристика панелей, изготавливаемых способом экструзии по данным проспекта фирмы «Universal Asbestos Manufacturing Co Ltd»

Показатель	Панель толщиной 50 мм	Панель толщиной 80 мм
Момент сопротивления в м³	$200 \cdot 10^{-6}$	$357 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности при изгибе в Па	$123 \cdot 10^5$	$123 \cdot 10^5$
Проектная нагрузка в кгс/м², при пролете 300 см	60	140
Разрушающая, равномерно-распределенная нагрузка в Н/м²	3000	5800
Прогиб	1/462	1/790

Из материалов, опубликованных в ГДР [88], видно, что асбестоцементные панели типа А. С. Е., изготавливаемые способом экструзии, имеют свойства, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Свойства асбестоцементных панелей, изготавливаемых способом экструзии (по данным, опубликованным в ГДР)

Показатели	Параллельно направлению экструзии	Перпендикулярно направлению экструзии
Предел прочности при изгибе в Па	$262 \cdot 10^5$	$203 \cdot 10^5$
Предел прочности при сжатии в Па	$469 \cdot 10^5$	$735 \cdot 10^5$
Предел прочности при растяжении в Па	$92 \cdot 10^5$	$68 \cdot 10^5$
Ударная вязкость в Дж/м²	$1,41 \cdot 10^3$	$0,88 \cdot 10^3$

По данным английских источников [87], экструзионный асбестоцемент имеет характеристики, приведенные в табл. 5.

Таблица 5. Свойства экструзионного асбестоцемента (по английским данным)

Свойства	Материал средней плотности	
Плотность в кг/м³	1200	1700
Предел прочности при изгибе в Па	$75 \cdot 10^5$	$225 \cdot 10^5$
Предел прочности при растяжении в Па	$30 \cdot 10^5$	$60 \cdot 10^5$
Предел прочности при сжатии в Па	$375 \cdot 10^5$	$750 \cdot 10^5$
Водопоглощение (за 48 ч) в %	50	18
Расширение при водонасыщении в %	0,3	0,2

Фирма «Eternit», образцы изделий которой представлены на рис. 6 [115], в своем проспекте сообщает, что экструзионные многопустотные панели в зависимости от типа изделия и пролета, на который они укладываются, способны выдерживать равномерно распределенную нагрузку, приведенную в табл. 6.

Объемная масса таких панелей 1700—1800 кг/м³. Для повышения теплозащитных свойств в панели иногда укладывают плитный утеплитель.

Образец японского экструзионного асбестоцемента, испытанный в НИИАсбестцементе, показал предел прочности при изгибе около $200 \cdot 10^5$ Па, ударную прочность около $2 \cdot 10^3$ Дж/м² и объемную массу 1800 кг/м³ (испытывался образец размером 50×20×7,5 мм). По данным

рентгеноструктурного анализа, в нем оказалось примерно 11% высокосортного асбеста и значительное количество искусственных органических волокон типа капрона.

Таблица 6. Разрушающая равномерно распределенная нагрузка для экструзионных панелей фирмы «Eternit»

Пролет в м	Разрушающая равномерно распределенная нагрузка, Н/м², для панелей толщиной		
	35 мм	60 мм	80 мм
0,5	—	250 000	460 000
1	—	75 000	125 000
1,5	11 000	33 000	50 000
2	—	16 000	29 000
3	—	7 500	10 000
4	—	3 750	5 100
5	—	2 300	3 300
6	—	—	1 900

Следует отметить значительные расхождения в физико-механических показателях экструзионного асбестоцемента, которые содержатся в различных источниках, что не позволяет получить достаточно полного представления о фактических свойствах экструзионного асбестоцемента.

ГЛАВА III

КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРОВ И ПРОЦЕСС ФОРМОВАНИЯ АСБЕСТОЦЕМЕНТА

1. КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРОВ

В зарубежной практике для формирования экструзионного асбестоцемента применяют шнековые прессы, аналогичные тем, которые используются в керамической промышленности.

Для изучения технологии получения асбестоцементных изделий способом экструзии в НИИАсбестцементе была сконструирована и изготовлена специальная экспериментальная установка (рис. 8). Она предназначалась также для уточнения некоторых конструктивных параметров прессующих органов, питающих устройств, привода и других конструктивных элементов.

Для расчета экспериментального экструдера применяли методы, используемые при конструировании ленточных прессов в керамической промышленности [61].

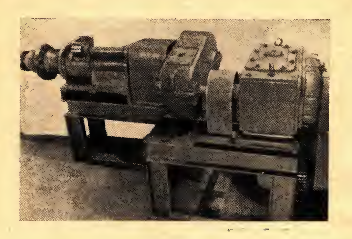


Рис. 8. Экспериментальная установка для получения асбестоцементных изделий способом экструзии

Размеры экспериментальной установки позволили изготовлять на ней асбестоцементные трубы диаметром 50 и 100 мм и толщиной стенок от 3 до 10 мм, т. е. реальные изделия, которые можно использовать на практике.

Данные расчета пресса показали, что на нем могут быть достигнуты нормальные давления, величины которых приведены в табл. 7.

Таблица 7. Расчетные величины нормальных давлений

Расчетная величина	Для трубы диаметром в мм	
	100	50
Усилие, развиваемое прессующим витком шнека, в Н:		
максимальное	91 000	135 000
минимальное	20 000	30 800
Давление прессования в Па:		
максимальное	$56 \cdot 10^5$	$520 \cdot 10^5$
минимальное	$12,3 \cdot 10^5$	$72,6 \cdot 10^5$

Экструзионный пресс включает в себя собственно экструдер и привод, размещенные, кроме электродвигателя, на общей сварной раме. Электродвигатель привода и общая рама смонтированы на фундаменте. Экструдер состоит из корпуса, мундштука, набора вставок, набора рубашек, шпинделя и сборного шнека.

Сборная конструкция корпуса обеспечивает выполнение исследований с различными типоразмерами шнеков, рубашек и формующих вставок мундштука. Установка имеет два привода: привод шнека и привод питающего валка. Для передачи крутящего момента от редуктора к валу смесителя, шнеку и питающему валку предусмотрен шпиндель, смонтированный в корпусе на двух радиальных роликовых подшипниках и двух упорных шариковых подшипниках.

Для установки сменных шнеков в шпинделе предусмотрено посадочное коническое отверстие с конусностью 7 : 24. Крепление шнека осуществляется с помощью специального стержня. Крутящий момент от шпинделя к шнекам передается при помощи двухкулачкового торцового соединения. На входном конце шпинделя имеется кулачковая муфта и шестерня для передачи крутящего момента к питающему валку.

Предусмотренный проектом набор шнеков обеспечивает проведение опытных работ по формованию труб диаметром 50 и 100 мм.

Шнеки сборные, сварной конструкции, имеют съемную прессующую часть, чем достигается возможность отработки режимов формования путем применения прессующих элементов различного конструктивного исполнения.

Транспортирующие витки шнека приварены к трубчатому стержню, который, в свою очередь, приварен к хвостовику.

В отличие от транспортирующей части шнека, имеющей однозаходную винтовую поверхность переменного шага, благодаря чему достигается предварительное уплотнение транспортируемой асбестоцементной массы, прессующая часть шнека выполнена двухзаходной с постоянным шагом. Литые съемные рубашки образуют полость, внутри которой вращается шнек, транспортируется и уплотняется асбестоцементная масса. На внутренней поверхности рубашек имеются продольные пазы, препятствующие вращательному движению массы при ее тран-

спортировании вдоль оси шнека. Мундштуки пресса снабжены сменными вставками для подбора наилучшей формы их рабочей поверхности.

Техническая характеристика экспериментальной установки

Число оборотов шнека в 1 мин	от 21 до 95
Регулирование числа оборотов шнека	осуществляется бесступенчатым вариантом БЦ.51.101-03; К-4,5
Электродвигатель типа А062-4 мощностью	10 кВт
с числом оборотов в 1 мин	1460
Редуктор главного привода РМ-500 IV	IV
Габаритные размеры установки в мм:	
длина	2915
ширина	2205
высота	1190
Масса установки в кг	1730

Как показали предварительные исследования при использовании конструкции формующих устройств, обычно применяемых в керамической промышленности, экструдирование асбестоцементных смесей с низким водотвердым отношением $\left(\frac{B}{T}=0{,}2—0{,}25\right)$ требует больших затрат мощности. Одним из возможных путей снижения расхода электроэнергии при экструзии является применение специальных конструкций формующих рабочих органов экструзионного пресса.

В экструдерах, применяемых в керамике, транспортирующий и уплотняющий элемент — шнек — располагается таким образом, что его последняя (выпорная) лопасть заканчивается до головки пресса. В головке и мундштуке пресса происходит уплотнение массы и ее формование путем продавливания, причем степень уплотнения зависит от фрикционных и пластических свойств используемой смеси.

Учитывая, что асбестоцементные смеси с низким B/T имеют недостаточную пластичность в экспериментальной установке, за шнеком предусмотрено дополнительное устройство, облегчающее продвижение массы к мундштуку и ее уплотнение.

Наружная поверхность дорна имеет винтовую резьбу различного профиля с постепенно уменьшающейся глу-

биной к концу. Число заходов резьбы по длине дорна постепенно увеличивается [25]. Применение такого конструктивного решения, как показал опыт, позволяет подвергать экструдированию асбестоцементные смеси с влажностью до 20—24% без использования пластификаторов.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве исходных сырьевых материалов для исследований применялись:

1) асбест марки П-5-65 Баженовского месторождения, характеристика которого приведена в табл. 8;

Таблица 8. Характеристика асбеста

Марка асбеста	Фракционный состав при гидроклассификации. Остатки на ситах в %					Степень распушки в мм рт. ст	Ситовый состав. Остаток на ситах в %		Ситовый состав. Пыль и галь в %	
	I +4,699	II +1,168	III +0,417	IV +0,147	промыв −0,147		II	III	всего	в том числе галя
П-5-65	8,5	13,7	11,2	11,6	55	473	—	78,5	8,4	0,68

2) портландцемент Воскресенского цементного завода марки 400, химико-минералогический состав которого приведен в табл. 9;

3) в качестве пластифицирующей добавки использовался полиакриламид, соответствующий СТУ 12.0221-64. Полиакриламид технический со следующей характеристикой: аммониевая форма; сухой остаток — 20,66; содержание полиакриламида — 6,2; содержание аммониевых солей — 69,94.

При переработке пластичных дисперсных масс в экструзионных прессах имеют место одновременно два вида деформации — сжатия и сдвига. Применительно к глиняным дисперсным массам этот вопрос изучен В. С. Фадеевой [83].

Напряженное состояние массы в формующей части пресса создается за счет работы нагнетания (шнека), в результате чего появляется напряжение P_0, действую-

Таблица 9. Химический и расчетный минералогический состав

Химический состав							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	п. п. п.	Σ
19,4	5,3	4,43	61,51	4,11	2,61	0,93	99,13

щее параллельно оси пресса, и напряжение бокового давления g_0, направленное нормально к оси пресса. Нормальное давление в основном сжимает и уплотняет массу.

Напряжение бокового давления пропорционально осевым напряжениям

$$g_0 = \xi P_0, \tag{2}$$

где ξ — коэффициент пропорциональности принято называть коэффициентом бокового давления (или бокового распора). Коэффициент ξ зависит от свойств массы, подвергаемой формованию.

Свойства формуемой массы в условиях деформации можно характеризовать следующими параметрами: коэффициентом бокового давления, коэффициентом внутреннего трения, предельным напряжением сдвига P_s и среза S, коэффициентом трения массы о стенки пресса μ.

Для глиняной массы величина наибольших нормальных давлений (g_0) в головке пресса находится в пределах 1,2—12·10[5] Па в зависимости от пустотности формуемого изделия. Значение коэффициентов внешнего трения (μ) для различных глин колеблется от 0,5 до 0,1 и удовлетворительно аппроксимируется гиперболой вида

$$\mu = \frac{0,32}{g_н + 0,45} - 0,15. \tag{3}$$

Для определения давлений, возникающих в головке экструзионного пресса ($F_т$), предлагается следующая формула:

$$F_т = \mu_{ср}\, g_{н.с}\, \omega, \tag{4}$$

где μ — коэффициент внешнего трения о стенку рассматриваемого звена (мундштука); $g_{н.с}$ — среднее нормальное давление на поверхность трения в Па; ω — площадь боковой поверхности звена в $см^2$.

портландцемента (клинкера) в %

гигроскопическая влага	нерастворимый остаток	$CaO_{своб}$	Минералогический состав			
			C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
0,05	0,62	0,3	55	11	6,5	13,5

При наклоне стенок звена под углом β:

$$g_{и.с} = \frac{g_0 \cos\beta + \frac{g_0}{3}\sin\beta}{2} = \frac{g_0}{2}\left(\cos\beta + \frac{1}{\xi}\sin\beta\right). \qquad (5)$$

Величина $A = \cos\beta + \frac{1}{\xi}\sin\beta$ названа коэффициентом конусности мундштука.

В. С. Фадеева предлагает следующую формулу для расчета формующих устройств экструдера на основании уравнения сдвига М. Н. Троицкой:

$$P_0 = \frac{K P_s f S_0}{S_0 - \xi \mu_{ср} A \omega} \text{ Па}, \qquad (6)$$

где K — коэффициент формы, равный отношению площади входа в мундштук S_0 к живому сечению выхода.

Для глиняной массы в результате предварительных испытаний В. С. Фадеевой были получены следующие расчетные характеристики: $\xi = 0{,}35$; $f = 0{,}28$; $\bar{\mu}_{ср} = 0{,}2$; $P_s = 9 \cdot 10^5$ Па.

Как видно из приведенных выше данных, разработка технологии и оборудования для экструзионного способа производства асбестоцементных изделий требует знания целого комплекса свойств асбестоцементных сырьевых смесей, среди которых важное место занимают их фрикционные характеристики.

Не менее существенное значение имеют величины давлений, которые возникают в экструзионном прессе в процессе формования изделий. Поскольку прочностные характеристики асбестоцемента в значительной мере зависят от ориентации асбеста, была также изучена ориентировка асбеста в трубах, получаемых способом экструзии.

3. ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

По современным представлениям различают внешнее и внутреннее трение.

Внешнее трение, в зависимости от состояния поверхности трущихся тел, может быть сухое, граничное, жидкостное, полусухое и полужидкостное. Кроме того, различают трение статическое и кинетическое, а также трение скольжения и трение качения.

По закону Амонтона-Кулона коэффициент трения (μ) определяется следующим отношением:

$$\mu = \frac{F}{P}, \tag{7}$$

где P — нормальная нагрузка; F — сила трения.

Как показали исследования ряда авторов [1, 11, 12, 19, 38, 48, 81], коэффициент трения пар для каждого вида трения зависит от качества обработки поверхностей, наличия пленок (в том числе и водных), температуры контакта, скорости скольжения, давления, наличия поверхностно-активных веществ и других факторов.

В настоящее время существует несколько взглядов на природу трения. Одни рассматривают трение как сопротивление при подъеме по микронеровностям. Контактирующие тела принимаются как абсолютно жесткие. Другие связывают трение с преодолением сил молекулярного (адгезионного) взаимодействия между телами. В нашей стране это направление развивается школой члена-корреспондента АН СССР Б. В. Дерягина [40], а за рубежом — Ф. П. Боуденом и Д. Тейбором.

При учете молекулярного взаимодействия закон трения выражается формулой

$$F = \mu P + C, \tag{8}$$

где C — равнодействующая сил молекулярного взаимодействия.

Исследователи третьего направления рассматривают трение как результат деформирования некоторого объема. Так, Г. И. Епифанов рассматривает трение как процесс сдвигообразования в тонких поверхностных слоях трущихся тел.

Широкую известность получила молекулярно-механическая теория трения, основные положения которой были сформулированы в 1946 г. проф. И. В. Крагельским. Согласно этой теории трение обусловлено механическими и молекулярными взаимодействиями.

Иследованию внешнего трения дисперсных материалов посвящено сравнительно мало работ. Известны работы по исследованию внешнего трения грунтов [19, 38], горных пород, в сыпучем состоянии торфов [1, 11, 12]. Г. С. Гура [38] в своих исследованиях отмечает сильное изменение свойств грунтов под влиянием влажности и давления. Под давлением в грунтах происходит уплотнение как в нормальном, так и в тангенциальном направлении.

Сопротивление грунтов сдвигу ($\tau_{ср}$, Па) зависит главным образом от давления, гранулометрического состава и влажности

$$\tau_{ср} = C + P \operatorname{tg} \beta, \tag{9}$$

где C — сила сцепления между частицами грунта; $\operatorname{tg} \beta$ — угол внутреннего трения; P — давление.

Трение при сдвиге может быть охарактеризовано статическим коэффициентом трения (в момент начала движения) и кинетическим коэффициентом трения (после начала движения).

Коэффициент трения стали μ по суглинкам и глине зависит в большей степени от состояния грунта, его физико-механических свойств и мало зависит от механических свойств твердого тела.

Для тонкодисперсных грунтов по исследованию Г. С. Гуры

$$\mu = \frac{\tau_{ср}}{P}, \tag{10}$$

где $\tau_{ср}$ — удельное сопротивление срезу; μ — коэффициент трения; P — давление.

Коэффициент трения грунтов зависит от влажности. В работе Ю. А. Ветрова [19] показано, что в интервале давлений от 2—6·10^5 Па при изменении влажности от воздушно-сухого состояния до максимальной молекулярной коэффициент трения грунтов уменьшается в 2—3 раза.

Влажность по-разному влияет на величину коэффициента трения: при увеличении влажности коэффициент трения может возрастать, уменьшаться и проходить через экстремум [1,19]. Влияние влажности на величину коэффициента трения авторы объясняют тем, что вода за счет смачивания сближает поверхность контакта. Гарди отмечает, что наибольшее значение коэффициент трения имеет в том случае, когда поверхности разделяются мономолекулярным слоем воды и с ростом

толщины пленки коэффициент трения уменьшается. Таким образом, присутствие воды является сначала причиной возрастания коэффициента трения, но, начиная с некоторого значения влажности, вода раздвигает частицы почвы, ослабляет связь между ними. В результате сцепление между частицами становится меньше, чем сцепление между почвой и металлом. Грунт прилипает к металлу и происходит трение почвы о почву, чем и объясняется снижение коэффициента трения.

А. С. Аморян [1] отмечает подобные зависимости коэффициента трения от влажности и для торфа. При этом зависимость коэффициента трения от давления имеет максимум. Эту зависимость автор тоже объясняет изменением толщины адсорбционного слоя при контакте.

По исследованиям И. И. Берковича [12] статическое трение торфа удовлетворительно описывается законом Амонтона — Кулона, коэффициент трения при возрастании нагрузки также проходит через максимум. Положение этого максимума зависит от влажности и при снижении давления смещается в область повышенных влажностей.

Внутренним трением, применительно к твердым телам, считают сопротивление, возникающее при относительном перемещении отдельных частей тела при его деформировании.

В реальных дисперсных материалах критическое касательное напряжение сдвига f_c связано с нормальным напряжением (P) и сцеплением между частицами (C_0) следующей зависимостью:

$$f_c = C_0 + \mu_c P, \qquad (11)$$

где μ_c — коэффициент сопротивления срезу.

Для сыпучих дисперсных материалов $C_0=0$ и зависимость имеет вид

$$f_c = \mu_c R. \qquad (12)$$

Сопротивление срезу включает в себя силу внутреннего трения и составляющую структурной прочности, вызванную резким упрочнением дисперсного материала под действием нагрузки:

$$f_c = R\ (P) + \mu_в P, \qquad (13)$$

где $\mu_в$ — коэффициент внутреннего трения; R — полное структурное сцепление, включающее в себя C_0.

Коэффициенты трения асбестоцементных смесей изучались К. Н. Николаевым и И. И. Бернеем.

По данным К. Н. Николаева и И. А. Боровкова [58], коэффициенты внутреннего трения асбестоцементных смесей в зависимости от влажности (16—20%) и площади сечения образца колеблются от 0,704 до 0,829. При этом они снижаются по мере увеличения влажности асбестоцементной смеси.

Коэффициент внешнего трения по чугуну составляет 0,591 при естественной влажности и 0,564 при влажности 10%.

По данным И. И. Бернея [13], коэффициент внешнего трения асбестоцементных смесей по стали составляет 0,21—0,27 для сухой смеси и 0,95—0,98 для смеси с влажностью от 10 до 24%. Эти данные были получены при нормальном давлении от 1 до $5 \cdot 10^5$ Па. Такая же величина коэффициента внешнего трения (0,95) получена и при давлении прессования от 50 до $200 \cdot 10^5$ Па.

Как видно из приведенных данных, полученные различными авторами значения коэффициентов трения существенно отличаются друг от друга, что, видимо, объясняется различием в использованных методах исследований.

Методика исследования трения асбестоцементных смесей

Исследование трения асбестоцементных смесей производилось на приборах ПТ-1 и РТ-0 (рис. 9)*.

С помощью прибора ПТ-1 изучали влияние нормального давления на величину статической силы трения асбестоцементных смесей. Прибор РТ-0 использовали для определения трения скольжения. Исследовалось влияние на кинетическую силу трения нормального давления, скорости и пути скольжения при различной влажности и содержании асбеста в смесях. Кроме того, с помощью прибора РТ-0 проводилось изучение внутреннего трения асбестоцементных смесей. Для приготовления асбестоцементных смесей использовали асбест П-5-65 и портландцемент марки 400 Воскресенского цементного завода. Удельная поверхность цемента 3500 см²/г.

---

* Приборы разработаны кафедрой физики Калининского политехнического института.

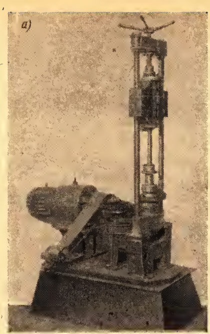
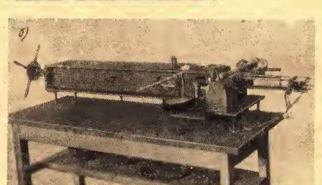


Рис. 9. Приборы для исследования трения асбестоцементных смесей

а — прибор ПТ-1; *б* — прибор РТ-0



Содержание асбеста в исследованных смесях и влажность смесей приведены ниже.

Содержание асбеста в %	10	15	20	25	25	25
Влажность в %	3	6	10	15	20	25

Таблица 10. Зависимость силы трения и коэффициента статического трения от содержания асбеста и влажности асбестоцементных смесей

Содержание асбеста в %	Влажность в %	Давление $18 \cdot 10^5$, Па		Давление $95{,}8 \cdot 10^5$, Па		Давление 228·105, Па	
		сила трения (f)	коэффициент статического трения (μ)	сила трения Па (f)	коэффициент статического трения (μ)	сила трения (f)	коэффициент статического трения (μ)
10	3	$6{,}4 \cdot 10^5$	0,355	$42{,}7 \cdot 10^5$	0,446	$143{,}3 \cdot 10^5$	0,497
	10	$7{,}7 \cdot 10^5$	0,422	$41{,}2 \cdot 10^5$	0,43	$131{,}1 \cdot 10^5$	0,455
	15	$8 \cdot 10^5$	0,499	$40{,}5 \cdot 10^5$	0,423	$126{,}4 \cdot 10^5$	0,439
	20	$8{,}5 \cdot 10^5$	0,472	$40{,}8 \cdot 10^5$	0,426	$126{,}2 \cdot 10^5$	0,438
	30	$7{,}6 \cdot 10^5$	0,422	$36{,}9 \cdot 10^5$	0,385	$114{,}4 \cdot 10^5$	0,397
15	3	$4{,}94 \cdot 10^5$	0,274	$41 \cdot 10^5$	0,428	$141{,}5 \cdot 10^5$	0,491
	10	$8{,}02 \cdot 10^5$	0,445	$35{,}4 \cdot 10^5$	0,369	$122{,}6 \cdot 10^5$	0,426
	15	$7{,}7 \cdot 10^5$	0,427	$41{,}1 \cdot 10^5$	0,429	$127 \cdot 10^5$	0,441
	20	$7{,}6 \cdot 10^5$	0,422	$40{,}6 \cdot 10^5$	0,424	$122{,}5 \cdot 10^5$	0,425
	30	$7{,}95 \cdot 10^5$	0,441	$40{,}2 \cdot 10^5$	0,419	$127{,}9 \cdot 10^5$	0,444
25	3	$4{,}1 \cdot 10^5$	0,228	$37{,}4 \cdot 10^5$	0,390	$143{,}8 \cdot 10^5$	0,513
	10	$7{,}1 \cdot 10^5$	0,394	$39{,}2 \cdot 10^5$	0,409	$123{,}7 \cdot 10^5$	0,43
	15	$7{,}2 \cdot 10^5$	0,4	$38{,}2 \cdot 10^5$	0,4	$121{,}6 \cdot 10^5$	0,422
	20	$7{,}9 \cdot 10^5$	0,438	$38{,}2 \cdot 10^5$	0,4	$119{,}1 \cdot 10^5$	0,414
	30	$7{,}1 \cdot 10^5$	0,394	$38 \cdot 10^5$	0,397	$119{,}7 \cdot 10^5$	0,416

Смеси приготовляли путем предварительного перемешивания компонентов вручную, а затем в лопастном смесителе. Эксперименты по определению фрикционных характеристик начинались спустя 5 мин после приготовления смесей.

Нормальное давление в процессе опытов поддерживалось постоянным. Каждый опыт повторялся 3—5 раз. На приборе ПТ-1 давления задавались в следующей последовательности: 20, 50, 100, 200 и $300 \cdot 10^5$ Па, а на приборе РТ-0: 10, 20, 30, 50 и $60 \cdot 10^5$ Па.

При исследовании влияния скорости скольжения на процесс трения задавались следующие скорости: 1, 10, 50 и 100 мм/с. Измерение кинетической силы трения и сопротивления образцов асбестоцементных смесей сдвигу осуществлялось с применением электротензометрирования.

Результаты исследования статической силы трения асбестоцементных смесей в зависимости от нагрузки, влажности и процентного содержания асбеста в асбестоцементной смеси показывают (табл. 10), что статическое трение асбестоцементных смесей подчиняется формуле Амонтона — Кулона [7] (рис. 10).

Зависимость коэффициента статического трения от влажности, при различных давлениях, для асбестоце-

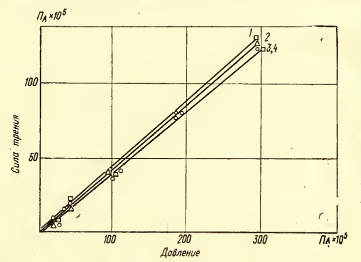


Рис. 10. Зависимость силы трения от давления
Влажность *1* — 6%; *2* — 3%; *3* — 10%; *4* — 15%

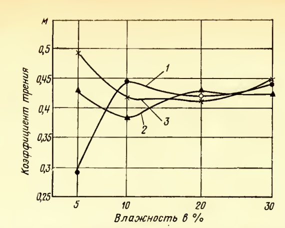


Рис. 11. Зависимость коэффициента статического трения от влажности асбестоцементной смеси

$1 - P = 18 \cdot 10^5$ Па; $2 - P = 95{,}8 \cdot 10^5$ Па; $3 - P = 228 \cdot 10^5$ Па

Таблица 11. Кинетическое трение $\left(\frac{f}{\mu}\right)$ для асбестоцементных смесей

Содержание асбеста в смеси в %	Влажность в %	Давление в Па				
		$10{,}8 \cdot 10^5$	$20{,}8 \cdot 10^5$	$30{,}8 \cdot 10^5$	$50{,}8 \cdot 10^5$	$60{,}8 \cdot 10^5$
100	3	$\frac{5{,}72}{0{,}529}$	$\frac{11{,}8}{0{,}565}$	$\frac{20{,}4}{0{,}66}$	$\frac{32}{0{,}63}$	$\frac{38{,}2}{0{,}626}$
25	15	$\frac{6{,}2}{0{,}571}$	$\frac{11{,}9}{0{,}57}$	—	$\frac{28{,}3}{0{,}576}$	$\frac{33}{0{,}542}$
15	3	$\frac{7{,}15}{0{,}66}$	$\frac{12{,}7}{0{,}609}$	$\frac{21{,}2}{0{,}686}$	$\frac{35}{0{,}688}$	$\frac{38{,}2}{0{,}626}$
15	10	$\frac{7{,}86}{0{,}726}$	$\frac{15{,}8}{0{,}756}$	—	$\frac{34}{0{,}669}$	$\frac{41{,}6}{0{,}684}$
15	15	$\frac{6{,}75}{0{,}623}$	$\frac{13{,}8}{0{,}661}$	—	$\frac{32{,}8}{0{,}645}$	$\frac{38{,}8}{0{,}638}$
15	20	$\frac{4{,}89}{0{,}451}$	$\frac{12}{0{,}575}$	—	$\frac{31{,}4}{0{,}688}$	$\frac{37{,}6}{0{,}616}$
10	15	$\frac{5{,}4}{0{,}499}$	$\frac{11{,}8}{0{,}565}$	—	$\frac{30{,}2}{0{,}594}$	$\frac{38{,}4}{0{,}63}$

ментной смеси с содержанием асбеста 15% приведена на рис. 11. Из нее видно, что увеличение влажности от 3 до 30% незначительно сказывается на увеличении коэффициента статического трения. Влияние количества асбеста на коэффициент статического трения показано на рис. 12.

Результаты изучения величин кинетической силы трения от давления, влажности и содержания асбеста в асбестоцементной смеси представлены в табл. 11 и на рис. 13. Из приведенных данных видно, что как и для статического трения, зависимость силы трения от давления при изменении содержания влаги и асбеста в исследованных диапазонах может быть описа-

Рис. 12. Зависимость коэффициента статического трения от содержания асбеста в асбестоцементной массе
1 — $P=18\cdot10^5$ Па; 2 — $P=95{,}8\cdot10^5$ Па; 3 — $P=228\cdot10^5$ Па

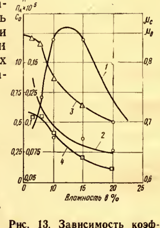


Рис. 13. Зависимость коэффициентов кинетического трения от влажности асбестоцементной смеси
1 — начальная структурная прочность; 2 — коэффициент упрочнения; 3 — коэффициент сдвига; 4 — коэффициент внутреннего трения

на линейной функцией в соответствии с приведенной выше формулой Амонтона — Кулона.

Зависимость коэффициента кинетического трения от влажности в интервале влажностей 5—10% имеет максимум. Такой же характер носит зависимость коэффициента трения от количества асбеста в смеси. В этом случае он соответствует 15%-ному содержанию асбеста.

Следует отметить, что коэффициенты кинетического трения асбестоцементных смесей существенно выше коэффициентов статического трения (табл. 12). Для давлений $50\cdot10^5$ Па они выше в зависимости от влаж-

Таблица 12. Данные сравнительных коэффициентов статического и кинетического трения асбестоцементной смеси с содержанием асбеста 15%

Влажность в %	Давление в Па			
	$20\cdot10^5$		$50\cdot10^5$	
	$\mu_{статич}$	$\mu_{кинетич}$	$\mu_{статич}$	$\mu_{кинетич}$
3	0,274	0,609	0,446	0,688
10	0,445	0,756	0,464	0,669
15	0,427	0,661	0,445	0,645
20	0,422	0,575	0,426	0,618

ности смеси на 40—50%. На величины коэффициентов трения оказывают влияние как влажность, так и содержание асбеста в асбестоцементной смеси. Однако более существенное влияние влажность оказывает на кинетическое трение.

Из приведенных данных видно, что коэффициенты трения (как статический, так и кинетический) возрастают с увеличением давления.

Сопротивление сдвигу и внутреннее трение

Исследование сдвига асбестоцементных смесей, в зависимости от технологических факторов, показывает, что уравнение сдвига может быть записано в следующем виде:

$$f_c = C_0 + k\rho + \mu_в\rho = C_0 + \rho\,(k - \mu_в) = C_0 + \rho - \mu_c, \qquad (14)$$

где f_c — касательное напряжение сдвига; C_0 — структурное сцепление при отсутствии давления; ρ — нормальное напряжение; k — коэффициент структурного сцепления; $\mu_в$ — коэффициент внутреннего трения.

Экспериментально определенные значения этих коэффициентов при различной влажности смеси, содержащей 15% асбеста, приведены в табл. 13.

Коэффициенты формулы сопротивления сдвигу в зависимости от содержания асбеста в смеси приведены в табл. 14.

Сопоставление результатов определения фрикционных характеристик асбестоцементных смесей с аналогичными данными для глиняных масс показывает, что

Таблица 13. Влияние влажности асбестоцементной смеси на коэффициенты формулы сопротивления сдвигу при содержании асбеста 15%

Влажность в %	$\mu_в$	k	$\mu_с$	C_a, Па
3	0,71	0,13	0,84	$0,7 \cdot 10^5$
6	0,71	0,12	0,83	$0,4 \cdot 10^5$
10	0,68	0,086	0,77	$1,2 \cdot 10^5$
15	0,64	0,086	0,73	$1,2 \cdot 10^5$
20	0,62	0,076	0,7	$0,7 \cdot 10^5$

Таблица 14. Влияние содержания асбеста в асбестоцементной смеси на коэффициенты формулы сопротивления сдвигу при влажности 15%

Количество асбеста в %	$\mu_в$	k	$\mu_с$	C_o, Па
10	0,72	0,076	0,8	$0,2 \cdot 10^5$
15	0,66	0,066	0,73	$1,2 \cdot 10^5$
25	0,64	0,14	0,78	$1 \cdot 10^5$
100*	0,48	0,18	0,66	$3,7 \cdot 10^5$

* Влажность 3%.

последние обладают значительно меньшим коэффициентом трения.

Так, коэффициенты внешнего трения глин не превышают 0,2—0,3, т. е. в 2—3 раза ниже, чем коэффициенты трения асбестоцементных смесей. Из данных, приведенных выше, известно, что при экструзионном способе формования в асбестоцементные смеси вводятся пластификаторы для снижения их внутреннего и внешнего коэффициентов трения.

В качестве одного из веществ, способного пластифицировать асбестоцементную массу, опробовался полиакриламид, характеристика которого приведена выше.

Полиакриламид вводился в количестве от 0,05 до 0,75% веса сухой смеси асбеста и цемента. Влияние полиакриламида на кинетическое трение асбестоцементной смеси влажностью 25%, содержащей 15% асбеста, представлено в табл. 15.

Анализ полученных данных показывает, что полиакриламид в количестве 0,25% и более оказывает суще-

Таблица 15. Влияние добавки полиакриламида на коэффициент кинетического трения асбестоцементных смесей

Давление P, $\frac{М Па}{м^2}$	Количество полиакриламида в %				
	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75
1	0,64	0,48	0,4	0,32	0,22

ственное влияние на снижение коэффициента кинетического трения асбестоцементной смеси. Так, при введении полиакриламида в количестве 0,5% коэффициент кинетического трения снижается в два раза, составляя всего 0,3—0,33, что приближается к коэффициенту кинетического трения глиняных масс.

Эффект воздействия полиакриламида на коэффициент трения связан, видимо, с его коагулирующим влиянием, в результате которого освобождается некоторое количество влаги, играющей роль жидкой смазки в механизме трения твердых поверхностей.

4. ДАВЛЕНИЕ АСБЕСТОЦЕМЕНТНОЙ МАССЫ В ЭКСТРУДЕРЕ

Свойства изделий, получаемых методом экструзии, в значительной степени зависят от усилий уплотнения асбестоцементной массы в экструдере. Поэтому определение величин давлений является необходимым как для управления свойствами готовых изделий, так и для получения исходных данных для проектирования нового оборудования.

При измерениях величин давлений асбестоцементной массы в цилиндре и головке экструдера были использованы дистанционные тензометрические мембранные датчики давления на 20 и $50 \cdot 10^5$ Па, которые были вмонтированы в трех сечениях установки (рис. 14). Тензометрические датчики представляют собой чувствительный элемент (мембрану) из стали 30ХГСА, на которую наклеены две спирали из константановой проволоки (датчики сопротивления). На рис. 15 показана электрическая и монтажная схемы мембранного датчика давления. При испытаниях датчики давления устанавливали с помощью специально изготовленных патронов. На рис. 16 показан патрон с датчиком. В корпусе цилиндра и головке эк-

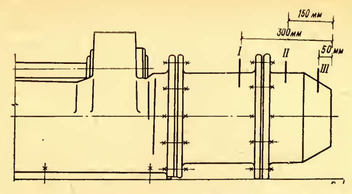


Рис. 14. Схема расположения датчиков для исследования нормальных давлений в экструдере

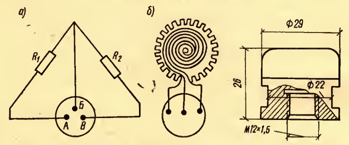


Рис. 15. Конструкция датчика и его электрическая и монтажная схемы

а — электрическая схема; *б* — монтажная схема

Рис. 16. Патрон с установленным на нем датчиком

струдера были просверлены отверстия для патрона с датчиком давления. Давление асбестоцементной массы передавалось на мембрану через специально изготовленный валик.

На рис. 17 приведен общий вид установки с закрепленными датчиками давления и измерительной аппаратурой.

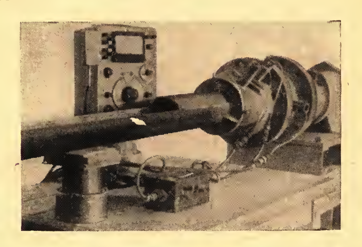


Рис. 17. Общий вид установки с закрепленными датчиками давлений и измерительной аппаратурой

При измерениях давлений применяли мостовую схему. Перед испытаниями были сняты кривые для каждого датчика давления. Тарировочные кривые представляли собой зависимость относительной деформации чувствительного элемента (мембраны) от давления. При снятии тарировочной кривой датчик давления устанавливали на пресс, и ступенями создавалась нагрузка на мембрану датчика, при этом измеряли относительные деформации (ε) в мембране. Деформации регистрировали с помощью электронного измерителя (ЭИД). Относительные деформации измеряли с точностью до $1 \cdot 10^{-5}$.

При измерениях давлений в процессе испытаний температура массы изменялась от комнатной до 30—70°С, поэтому использовался способ компенсации температурных погрешностей, заключающийся в том, что в компен-

Таблица 16. Величины нормальиых давлеиий в зависимости от влажности асбестоцемеитиой массы, содержаиия в иеи асбеста и пластифицирующей добавки

Влажность асбестоцементной массы в %	Содержание полиакриламида в %	Нормальное давление в Па, содержание асбеста в %: 10			13			17			20		
		I датчик	II датчик	III датчик	I датчик	II датчик	III датчик	I датчик	II датчик	III датчик	I датчик	II датчик	III датчик
20	—	$8\cdot10^5$	$34\cdot10^5$	$17\cdot10^5$	$6\cdot10^5$	$31\cdot10^5$	$15\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	$26\cdot10^5$	$13\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$23\cdot10^5$	$11\cdot10^5$
20	0,25	$7\cdot10^5$	$30\cdot10^5$	$14\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	$27\cdot10^5$	$13\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$21\cdot10^5$	$10\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$17\cdot10^5$	$9\cdot10^5$
22	—	$8\cdot10^5$	$26\cdot10^5$	$12\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	$24\cdot10^5$	$10\cdot10^5$	$6\cdot10^5$	$20\cdot10^5$	$8\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$17\cdot10^5$	$7\cdot10^5$
22	0,25	$5\cdot10^5$	$22\cdot10^5$	$10\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$18\cdot10^5$	$7\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$16\cdot10^5$	$7\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$12\cdot10^5$	$5\cdot10^5$
24	—	$6\cdot10^5$	$23\cdot10^5$	$10\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$20\cdot10^5$	$10\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$17\cdot10^5$	$8\cdot10^5$	$2\cdot10^5$	14.10^5	$6\cdot10^5$
24	0,25	$2\cdot10^5$	$17\cdot10^5$	$6\cdot10^5$	$1\cdot10^5$	$14\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	$1\cdot10^5$	$12\cdot10^5$	$4\cdot10^5$	$1\cdot10^5$	$9\cdot10^5$	$2\cdot10^5$

сационное плечо измерительного моста включается тензодатчик из той же партии, что и активный, но наклеенный на недеформируемую пластину из того же материала, из которого изготовлена мембрана.

В ходе испытаний производились записи деформаций чувствительного элемента датчика давления до подачи асбестоцементной массы в цилиндр и головку экструдера («нулевой» отсчет) и при загрузке массой по электронному измерителю (ЭИД) по разнице между величинами рабочего и нулевого отсчетов. С помощью градуировочных графиков определяли давления в экструдере.

Величину нормальных давлений в экструдере определяли в зависимости от содержания асбеста в асбестоцементной массе: 10, 13, 17 и 20%; влажности: 20, 22 и 24%; наличия пластифицирующей добавки — 0,25%.

Результаты измерений приведены в табл. 16 и на рис. 18—21.

Анализ полученных данных показывает, что нормальное давление, развивающееся в экструдере при формовании асбестоцементных смесей, повышается в зоне максимального уплотнения (датчик II) и снижается по выходе изделия из формующего устройства (датчик III), максимальная величина нормального давления составляет $30—34 \cdot 10^5$ Па при содержании 10—13% асбеста в асбестоцементной массе и влажности 20%. Значительное влияние на величину нормального давления оказывает влажность исходной асбестоцементной смеси. Величины нормальных давлений снижаются по мере увеличения содержания асбеста в асбестоцементной массе и для различных значений влажности описываются следующими уравнениями прямых:

$$\text{при } W = 20\% \quad P = -1{,}1\,\lambda + 45; \qquad (15)$$

$$\text{при } W = 22\% \quad P = -0{,}9\,\lambda + 35; \qquad (16)$$

$$\text{при } W = 24\% \quad P = -0{,}9\,\lambda + 32, \qquad (17)$$

где λ — содержание асбеста в асбестоцементной массе в %.

Использование пластифицирующей добавки — полиакриламида — в количестве 0,25% к весу сухих составляющих оказывает заметное влияние на снижение величин нормальных давлений.

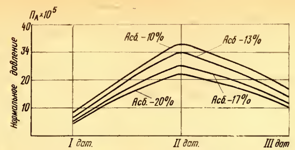


Рис. 18. Изменение нормального давления в корпусе и головке пресса

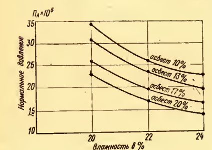


Рис. 19. Влияние влажности исходной смеси на изменение нормального давления

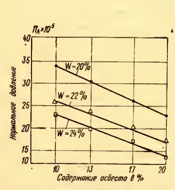


Рис. 20. Зависимость нормального давления от содержания асбеста при различной влажности асбестоцементной смеси

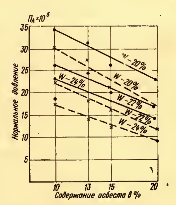


Рис. 21. Влияние 0,25% добавки полиакриламида на изменение нормального давления

——— без добавки полиакриламида; — — — — с добавкой 0,25% полиакриламида

5. ОРИЕНТАЦИЯ ВОЛОКОН АСБЕСТА ПРИ ЭКСТРУДИРОВАНИИ АСБЕСТОЦЕМЕНТНОЙ МАССЫ

Преимущественную ориентацию волокон асбеста при экструдировании асбестоцементной массы изучали с помощью рентгенографического метода исследований.

Была принята следующая система координат: ось Y направлена вдоль образующей цилиндра (трубы), ось X — по касательной к окружности и ось Z — по радиусу (рис. 22, *а*). Развертка цилиндра, разрезанного вдоль образующей, представлена на рис. 22.

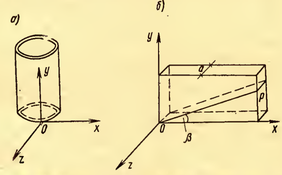


Рис. 22. К исследованию преимущественной ориентации асбеста в образцах труб

а — положение координатных осей относительно трубы; *б* — развертка трубы

Степень ориентации волокон асбеста характеризуется функцией распределения $h\ |(\beta)|$, показывающей отношение весовой части волокон, оси которых расположены под углом к оси OX, к весовой доли волокон, оси которых параллельны оси OX (угол $\beta=0°$). В этом случае h (90°) показывает весовую долю волокон, направленных вдоль образующей трубы, по отношению к весовой доле волокон, ориентированных по касательной к окружности. Функцию h (β) можно изучать как в поверхностных слоях трубы, так и в слоях, расположенных на различной глубине ее стенок.

Для рентгенографического исследования степени ориентации использовали метод съемки «на просвет». Геометрия съемки в дифрактометре показаны на рис. 23.

Съемки осуществляли на дифрактометре УРС-50И с

приставкой для исследования текстур ГП-2. Использовали отфильтрованное излучение $Cu \cdot K_{\alpha}$. Детектором служил сцинтилляционный счетчик СРС-1. Для увеличения облучаемой поверхности образца, с целью усреднения результатов, образец во время съемки совершал возвратно-поступательное движение с амплитудой 6 мм. Величина облучаемой поверхности составляла 144 мм².

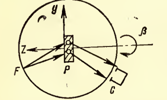


Рис. 23. Геометрия съемки в дифрактометре методом съемки «на просвет»

Расходящийся пучок рентгеновских лучей, испускаемых фокусом рентгеновской трубки F, падает на образец P (рис. 23). Рассеянные лучи попадают на счетчик C, установленный под углом 2 θ, соответствующим дифракционному пику хризотиласбеста с кристаллографическими индексами 200 на излучение $Cu \cdot K_{\alpha}$; угол $2\theta = 12°10'$.

При указанном положении образца в отражении рентгеновских лучей участвуют волокна, направленные вдоль оси OX, перпендикулярной плоскости чертежа.

Интенсивность отражения I_0 пропорциональна доли волокон по массе, ориентированных вдоль оси OX, т. е. касательных к окружности.

Поворачивая образец вокруг оси OX на углы β, равные 30, 60 и 90°, определяют интенсивность рентгеновских лучей, рассеянных волокнами, образующими соответствующие углы β с осью OX.

Если обозначить интенсивность лучей, рассеянных образцом, повернутым на угол β величиной I_{β}, то функция распределения волокон по направлениям, показывающая степень ориентации волокон, выражается следующим образом:

$$h_{\beta} = \frac{I_{\beta}}{I_0} . \qquad (18)$$

Из-за существенного размытия дифракционного пика 200 приходится измерять его интегральную интенсивность (площадь дифракционного пика). Интервал съемки аналитического пика 200 угла 2 θ 10—14°.

Измерение интегральной интенсивности степени ориентации волокон асбеста в образцах осуществлялось с помощью автоматического приспособления к измерительному устройству ССД, позволяющему получать на цифропечатающей машине суммарную интенсивность пика и фона J_{Σ} в заданном интервале съемки.

Одновременно с целью контроля записывали участок рентгенограммы, содержащий измеряемый пик на самописце ЗПП-09.

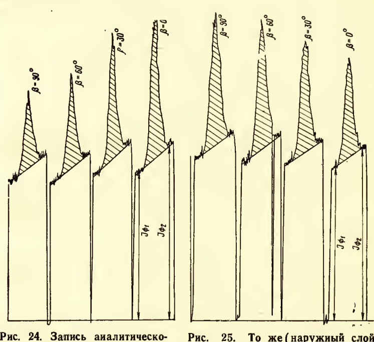


Рис. 24. Запись аиалитического пика асбеста 200 прн поворотах образца (виутрениий слой трубы)

Рис. 25. То же (наружный слой трубы)

Примеры записи приведены на рис. 24, 25. Интегральную интенсивность пика J_{β} рассчитывали по формуле:

$$J_{\beta} = J_{\Sigma} - \frac{J_{\Phi_1} + J_{\Phi_2}}{2T} \cdot \frac{2\,\theta_2 - 2\,\theta_1}{\eta}, \qquad (19)$$

где η — скорость движеиия счетчнка; T — время нзмереиия ннтенсивности фона.

При съемке «на просвет» образцы должны быть плоскими и иметь толщину, близкую к оптимальной:

$$t_{опт} \approx \frac{1}{\mu \sec \theta}, \qquad (20)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей; θ — угол отражения.

Для асбестоцементных материалов на излучении Cu·K_α $\mu = 160^{-1}$ оптимальная толщина равна примерно 0,006 см. Однако получить образец такой толщины практически невозможно. Вместе с тем коэффициент ослабления можно существенно уменьшить, если обработать образец в течение 30—60 мин в 10%-ном растворе HCl. Снижение величины μ происходит вследствие растворения вяжущего в соляной кислоте.

Для образцов из экструзионных труб, протравленных в растворе соляной кислоты, оптимальная толщина составила 0,7 мм. Образцы в виде колец с толщиной стенки 0,7—0,8 мм вытачивали из труб на токарном станке. Так как представляет интерес исследование ориентации как во внутренних, так и во внешних слоях труб, то образцы-кольца вытачивали таким образом, чтобы представлять и тот и другой слой. После обработки HCl влажные асбестоцементные образцы после разрезания по образующей легко распрямляются и получаются в виде тонких пластинок.

В лаборатории физических методов НИИАсбестцемента проводились многократные исследования по определению преимущественной ориентации волокон асбеста в асбестоцементных пленках, взятых с трубных и листоформовочных машин. Так как методика исследования ориентации в экструзионных трубах отличалась от применяемой ранее, то необходимо было сравнить результаты исследования ориентации в пленках и образцах, полученных описанным выше способом. С этой целью из трубы диаметром 100 мм, изготовленной на комбинате «Красный строитель» при обычных технологических параметрах, вытачивали образцы в виде колец. Их обрабатывали так же, как и образцы из экструзионных труб. Результаты исследования ориентации в асбестоцементной трубе, полученной на круглосеточной машине, представлены на рис. 26 в виде функции h_β.

Ориентация асбеста и количественные характеристики близки к тем, которые были получены в работе [42]

на образцах в виде пленок, что подтверждает правильность методики.

Результаты выполненных измерений представлены на рис. 27 в виде графиков функций распределения волокон h_β для ряда исследованных образцов труб. Каждая точка кривой h_β представляет среднюю арифметическую величину при измерении n образцов:

$$h_{\text{ср}\,\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{N} h_{i\,(\beta)}}{n}. \tag{21}$$

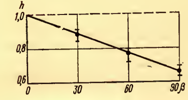


Рис. 26. Характер ориентации асбеста в трубе, полученной на круглосеточной трубоформовочной машине

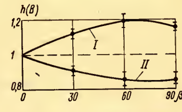


Рис. 27 Преимущественная ориентация волокон асбеста в трубе, полученной методом экструзии

I — ориентация по касательной к окружности трубы; *II* — ориентация вдоль образующей трубы

Для испытанных труб величина n составляла 5—15. В этом случае средняя арифметическая погрешность одного измерения Δh определяется как:

$$\Delta h = \frac{\Sigma\,(h_{\text{ср}} - h_i)}{n}, \tag{22}$$

а погрешность среднего значения из n измерений будет приблизительно в $\sqrt{n}$ раз меньше:

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{\Delta h}{\sqrt{n}}. \tag{23}$$

Величины $\Delta h_{\text{ср}}$ показаны на графике и обычно не превышали 2—5%.

Как следует из результатов, приведенных на рис. 27, в поверхностных слоях величны $h_{(\beta)}$ монотонно возрастают с увеличением угла β, достигая максимального значения при $\beta = 60 \cdots 90°$. Таким образом, в поверхностных

слоях волокна преимущественно ориентируются вдоль образующей трубы. Во внутренних слоях величины $h(\beta)$ уменьшаются при увеличении угла β и волокна асбеста преимущественно ориентируются по касательной к окружности трубы, т. е. так же, как и в трубах, получаемых на круглосеточных трубоформовочных машинах. Такую ориентацию во внутренних слоях можно объяснить тем, что волокна асбеста увлекаются вращением дорна. Во внешних слоях ориентирующее действие оказывает сила трения о неподвижную рубашку цилиндра пресса, направленная вдоль его оси. Следует отметить, что степень ориентации в поверхностных слоях ниже, чем во внутренних слоях. Исследования показали, что ориентация волокон асбеста при формовании труб способом экструзии связана с относительным перемещением асбестоцементной массы и деталей экструдера. Поэтому правомерно предположение, что, регулируя скорости движения массы и меняя конструкцию рабочих органов экструдера, можно оказывать влияние на ориентацию асбеста в асбестоцементных трубах, производимых способом экструзии.

Таким образом, выполненные исследования показали, что коэффициенты внешнего трения асбестоцементных смесей обычных составов значительно выше, чем аналогичные фрикционные характеристики глиняных и пластических масс.

Коэффициенты статического и кинетического внешнего трения асбестоцементных смесей подчиняются закону Амонтона — Кулона (7), и на их величину существенное влияние оказывают количество асбеста, влажность асбестоцементной массы и величины нормального давления.

Сопротивление сдвигу асбестоцементных смесей может быть выражено уравнением (14), связывающим указанную величину с величинами структурного сцепления при отсутствии нормального давления, коэффициентом структурного сцепления и коэффициентом внутреннего трения.

Коэффициенты трения асбестоцементных смесей зависят от влажности и содержания асбеста и уменьшаются по мере их возрастания от 0,72 до 0,48.

Коэффициент кинетического трения асбестоцементных смесей существенно снижается при введении пластифицирующей добавки—полиакриламида. Так, при ис-

пользовании ее в количестве 0,5% от массы сухих веществ коэффициент кинетического трения снижается вдвое и составляет 0,3—0,35, что приближается к значению коэффициента трения глиняных материалов.

Нормальное давление, развивающееся при формовании асбестоцементных смесей в экструдере, повышается в зоне уплотнения и снижается по выходе изделия из формующего устройства. Максимальная зафиксированная величина нормального давления составила 30—34·10^5 Па при содержании в асбестоцементной массе 10—13% асбеста и влажности ее 20%. Нормальное давление снижается по мере увеличения влажности асбестоцементной массы и содержания асбеста в смеси в пределах изученного интервала. Применение пластифицирующей добавки в количестве 0,25% сказывается на снижение нормального давления при формовании. С учетом изменения влажности асбестоцементных смесей пластифицирование снижает величину нормального давления в зоне максимального уплотнения в 1,5—2 раза.

В результате изучения фрикционных характеристик асбестоцементных смесей и величин нормальных давлений в экструдере получены данные, необходимые при конструировании основного технологического оборудования для экструзионной технологии асбестоцемента.

ГЛАВА IV

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА СЫРЬЯ И ДРУГИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТА, ПОЛУЧАЕМОГО СПОСОБОМ ЭКСТРУЗИИ

1. ВЛИЯНИЕ СЫРЬЯ И РЕЖИМОВ ЕГО ПОДГОТОВКИ

Методика технологических исследований

Оценка свойств асбестоцемента, получаемого способом экструзии, проводилась на образцах труб, полученных на описанной выше экспериментальной установке.

Асбестоцементную массу приготовляли в лабораторной мешалке, в которой вначале готовили сухую асбестоцементную смесь, а затем вводили в заданном количестве воду и перемешивали определенное время.

В ряде опытов в массу вводили пластификатор-полиакриламид. Приготовленную асбестоцементную массу загружали в работающий экструдер. По выходе из экструдера трубы принимались на лотки, на которых они находились в течение 18—20 ч в помещении лаборатории. Затем трубы погружали в воду при температуре 18—20°С, в которой находились до момента испытания.

Свойства изготовленных труб оценивали в возрасте 14 суток после формования по следующим показателям:

а) разрывное давление P (в МПа) определялось на образцах труб длиной 50 см на гидравлическом прессе в соответствии с требованиями ГОСТ 1839—48 [34];

б) предел прочности при разрыве трубы $R_{разр}$ (в Па) определяется по формуле

$$R_{разр} = \frac{P\,(d + S)}{2\,S}\,, \qquad (24)$$

где d — внутренний диаметр трубы в см; S — толщина стенки трубы в месте разрыва в см;

в) предел прочности при раздавливании $R_{разд}$ (в Па) определяли по формуле

$$R_{разд} = 0{,}955\ \frac{P\,(d + S)}{l\,S^2}\,, \qquad (25)$$

где P — усилие при раздавливании в Па; l — длина образца трубы в см;

г) водопоглощение образцов труб (W %) и объемную массу (γ кг/м³) определяли по формулам:

$$W = \frac{g_1 - g}{g}\ 100; \qquad (26)$$

$$\gamma = \frac{g}{g_1 - g_2}\,, \qquad (27)$$

где g — масса образца, высушенного в течение 24 ч, в кг; g_1 — масса образца, насыщенного водой на воздухе, в кг; g_2 — масса образца, насыщенного водой в воде, в кг;

д) ударную вязкость образцов труб $R_{уд}$ (в Дж/м²) определяли по формуле

$$R_{уд} = \frac{A}{b\,h}\,, \qquad (28)$$

где A — работа, затраченная на разрушение образца при ударе, в Дж; b — ширина образца в м; h — толщина образца в м.

Основные технические свойства асбестоцемента, получаемого на круглосеточных машинах

Для дальнейшей объективной оценки возможности экструзионного способа производства асбестоцементных изделий целесообразно рассмотреть основные свойства изделий, изготавливаемых по традиционной технологии, а также влияние на них сырьевых компонентов.

Асбестоцемент представляет собой цементный камень, дисперсно армированный волокнами асбеста. Введение в цементный камень асбеста резко изменяет его свойства, значительно повышая прочность материала на изгиб, растяжение и удар, аналогично арматуре в железобетоне. Так, предел прочности при изгибе и ударе асбестоцемента по сравнению с неармированным цементным камнем возрастает в 2,5—3 раза при использовании 5—6-го («шиферных») сортов асбеста и более значительно — при использовании 3—4-го («трубных») сортов асбеста.

Наряду с высокими прочностными показателями асбестоцементные изделия огнестойки, атмосферостойки и гнилостойки, легко гвоздятся и поддаются механической обработке. Указанные свойства асбестоцемента делают его эффективным для использования в строительстве в виде тонкостенных изделий.

Свойства асбестоцемента как материала изложены в ряде работ [4, 16, 65, 79]. Наиболее полно они систематизированы в работе Г. С. Блоха и А. Н. Литвинова [16]. Нами рассмотрены те из основных свойств асбестоцемента, которые изучались применительно к экструзионной технологии.

Предел прочности асбестоцемента при изгибе ($R_{изг}$) зависит от ряда факторов и прежде всего от качества асбеста и цемента. Значительное влияние на прочность оказывает и плотность. Как установлено И. И. Бернеем [14], зависимость между прочностью асбестоцемента, изготовленного на круглосеточных листоформовочных машинах, и объемной массой может быть выражена следующим уравнением:

$$R_{изг} = k\gamma^2, \qquad (29)$$

где k — постоянная величина, зависящая от качества сырья и технологических условий изготовления асбестоцемента.

На прочность асбестоцемента влияет и его влажность. Асбестоцемент, высушенный до постоянного веса, имеет прочность при растяжении и изгибе на 12—18% больше,

чем в воздушно-сухом состоянии. Прочностные показатели листового асбестоцемента (в сильном направлении) приведены в табл. 17.

Таблица 17. Прочностные показатели листового асбестоцемента

Асбестоцементные изделия	Сорт асбеста	Объемная масса в кг/м³	Предел прочности в Па	
			при растяжении	при изгибе
Непрессованные профилированные листы	5—6	—	$100—125 \cdot 10^5$	$160—210 \cdot 10^5$
То же	4—5	—	$120—135 \cdot 10^5$	$180—220 \cdot 10^5$
Непрессованные плоские листы	5—6	1500—1600	$115—150 \cdot 10^5$	$190—250 \cdot 10^5$
То же	4—5	—	$135—170 \cdot 10^5$	$215—270 \cdot 10^5$
Прессованные листы	5—6	1900—2000	$160—195 \cdot 10^5$	$270—320 \cdot 10^5$
То же	3—5	—	$200—250 \cdot 10^5$	$340—420 \cdot 10^5$

Прочность асбестоцемента во времени растет, что видно из данных, приведенных в табл. 18.

Таблица 18. Изменение прочности асбестоцемента во времени

Возраст асбестоцемента в сут	Предел прочности при изгибе в %	Возраст асбестоцемента в г	Предел прочности при изгибе в %
7	75	1	116
14	90	5	119
28	100*	10	121
90	112	20	125

* За 100% принята прочность в возрасте 28 сут., равная $190 \cdot 10^5$ Па.

Для асбестоцементных труб предел прочности при изгибе ($R_{изг}$) характеризуется следующими величинами (табл. 19).

Коэффициент однородности асбестоцемента, вырабатываемого на круглосеточных машинах, по данным Л. Н. Пицкеля и М. С. Русиной [66], составляет при поперечном изгибе 0,65—0,7, а при осевом растяжении — 0,5—0,55

Таблица 19. Прочностные показатели асбестоцементных труб

Трубы	Сортамент асбеста	Объемная масса в кг/м³	Предел прочности в Па
Водопроводные	3—4	1800—1900	$300—350 \cdot 10^5$
Канализационные	3—4—5	1600—1700	$210—250 \cdot 10^5$

Ударная вязкость асбестоцемента характеризуется пределом прочности при ударном изгибе, которая вычисляется как частное от деления величины работы, затрачиваемой на разрушение асбестоцементного образца на площадь его поперечного сечения. В свою очередь, сила, которую надо приложить для разрушения материала, пропорциональна его деформационной способности.

Предельная деформативность материала характеризуется величиной относительного удлинения к моменту разрушения материала и составляет по данным Л. Н. Пицкеля [66] и Т. М. Берковича [6]—$(20—40) 10^{-5}$, а по данным Ю. А. Арго [2] $(55—65) 10^{-5}$. Эта величина весьма невелика, что и определяет сравнительно невысокую сопротивляемость асбестоцемента ударным нагрузкам.

Как отмечалось выше, ударная вязкость асбестоцемента зависит главным образом от количества и качества используемого асбеста.

Ударная вязкость неармированного цементного камня примерно $0{,}45 \cdot 10^3$ Дж/м² [26]. Для листовых асбестоцементных изделий, изготовленных на асбесте, 5—6-го сорта ударная вязкость колеблется от 1 до $2{,}5 \times 10^3$ Дж/м².

Асбестоцемент, изготовленный на асбесте 3—4-го сортов, имеет ударную вязкость от 3 до $5 \cdot 10^3$ Дж/м². Ударная вязкость несколько повышается с ростом плотности материала, а также растет при увеличении влажности асбестоцемента (за счет увеличения его деформативности).

Зависимость ударной вязкости асбестоцемента от влажности определяется по формуле, предложенной Г. С. Блохом [16]:

$$R_{уд} = R_0 + 0{,}011\,\omega, \qquad (30)$$

где R_0 — величина ударной вязкости сухого асбестоцемента; ω — влажность испытываемого образца в %.

Армирующая способность асбеста в асбестоцементе определяется, при прочих равных условиях, главным

образом, величиной сцепления волокон с цементным камнем. В свою очередь, величина сцепления с цементным камнем тем выше, чем выше удельная поверхность асбеста, а также степень гидратации цемента. В связи с этим для более полного использования армирующих свойств асбеста следует стремиться к более тонкой распушке и к использованию тонкодисперсных цементов, что, однако, не всегда возможно, учитывая требования применяемой традиционной технологии.

Как показали работы Л. А. Лукошкиной и др., тонкая распушка положительно влияет на прочностные свойства асбестоцемента, так как прочность волокон асбеста повышается по мере уменьшения их диаметра. Волокна диаметром 5 мк имели в среднем предел прочности при растяжении $18000 \cdot 10^5$ Па, диаметром 10мк — 12000×10^5 Па, диаметром 15 мк — $8000 \cdot 10^5$ Па, диаметром 30 мк — $4000 \cdot 10^5$ Па и диаметром 60 мк — $2000 \cdot 10^5$ Па [49].

Рассматривая влияние асбеста на прочность асбестоцемента, Е. Н. Китаев предложил следующую зависимость между пределом прочности при изгибе и количеством асбеста и цемента [43]:

$$R_{изг} = k \frac{5,33 \ (M_а + M_ц)}{M_ц}, \qquad (31)$$

где k — коэффициент, определяющий качество волокон асбеста; $M_а$ и $M_ц$ — процентное содержание асбеста и цемента в асбестоцементе.

П. Н. Соколов считает, что для асбестоцемента имеет существенное значение не длина волокна, а отношение длины волокна к его диаметру и, при более тонкой распушке асбеста и применении более тонкомолотого цемента, можно, используя коротковолокнистые сорта асбеста, получить изделия той же механической прочности, что и при использовании длинноволокнистого асбеста.

Оптимальное соотношение длины волокна к диаметру должно составлять от 83 до 130 в зависимости от вида продукции и силы сцепления волокна асбеста с цементом.

Для проектирования состава асбестоцемента П. Н. Соколовым предложена следующая формула:

$$\frac{a}{b} = 0,11 \ \frac{d_а^2}{(d_а + d_ц) \, d_ц}, \qquad (32)$$

где a — содержание асбеста в %; b — содержание цемента в %; $d_а$ — средний диаметр волокон асбеста в мк; $d_ц$ — средний диаметр зерен цемента в мк.

Подробные исследования влияния сорта и количества асбеста на физико-механические показатели асбестоцемента выполнены в НИИАсбестцементе Л. А. Лукошкиной и Ф. Л. Давыдовой [49]. Было показано, что зависимость, предложенная Е. Н. Китаевым, справедлива только при определенных пределах значений $M_а$ и $M_п$. В этой же работе отмечается, что формула (32), предложенная для проектирования состава асбестоцемента, относится только к чистому обеспыленному волокну и неприменима к товарному асбесту. При использовании последнего в формулу должны быть введены поправочные коэффициенты в зависимости от степени запыленности волокна.

В дальнейшем Е. Н. Китаев, изучая влияние на свойства асбестоцемента и производительность листоформовочного оборудования количества, сортамента и степени распушки асбеста, показал, что при увеличении содержания асбеста в асбестоцементе с 10 до 16% прочность при изгибе в возрасте 7 сут. возросла со $160 \cdot 10^5$ Па до $225 \cdot 10^5$ Па (состав смески асбеста: П-5-50—40%; М-6-60—40% и П-6-45—20%). Аналогичное влияние оказывает и рост степени распушки асбеста с 60—65 до 90—95%.

Портландцемент является одним из основных видов сырья, используемого в производстве асбестоцементных изделий. Как отмечает Т. М. Беркович [4, 7], опыт промышленности и результаты научно-исследовательских работ позволили установить, что для достижения высоких физико-механических показателей асбестоцемента в короткие сроки твердения должны применяться портландцементы достаточно высокой марки (400—500) с нормированным химико-минералогическим составом ($C_3S \geqslant 50\%$, $C_3A = 4 \cdots 8\%$, $SO_3 = 1{,}5 \cdots 3{,}5\%$).

Оптимальная дисперсность цемента зависит от сортамента и физико-химических свойств примененного асбеста и его содержания, а также от химико-минералогического состава клинкера и условий формования асбестоцемента.

Так, в лабораторных опытах Е. Н. Китаева [44] показано, что увеличение удельной поверхности алитового портландцемента до 4500 см²/г способствует по-

вышению прочности прессованных асбестоцементных образцов. К аналогичному выводу в дальнейшем пришла Т. М. Славина, которая в результате лабораторных работ подтвердила, что использование алитовых портландцементов, содержащих C_3A до 6—8% с удельной поверхностью 4100—4700 см²/г, приводит к росту физико-механических показателей прессованного асбестоцемента [78].

В практических же условиях было показано, что повышение тонкости помола выше 3000—3500 см²/г ухудшает фильтрационные свойства асбестоцементных суспензий и приводит вследствие этого к снижению производительности круглосеточных листоформовочных машин. Одновременно вследствие повышенной водоудерживающей способности отфильтрованных асбестоцементных слоев снижается плотность и соответственно прочность асбестоцементных листов.

Еще больше приходится ограничивать дисперсность портландцемента при содержании в нем повышенного количества C_3A (8—12%). В этом случае удельная поверхность цемента не должна превышать 2200—2500 см²/г. В последнее время в связи с использованием в производстве листовых асбестоцементных изделий асбеста Джетыгаринского месторождения, обладающего повышенной водоудерживающей способностью, тонкость помола цемента даже при содержании C_3A не выше 8% ограничивается до 2200—2500 см²/г.

В производстве асбестоцементных труб, где применяется асбест повышенного сортамента и в больших количествах, чем в производстве листовых изделий, оптимальная дисперсность цемента выше и может быть принята в пределах 3000—3500 см²/г.

Влияние сырья и некоторых других технологических факторов на свойства асбестоцемента, получаемого методом экструзии

Изучение зависимостей физико-механических свойств изделий, полученных способом экструзии от основных технологических факторов, производилось с применением метода математического планирования эксперимента, что дает возможность получить информацию о многофакторной зависимости при минимальном ко-

личестве опытов, так как позволяет одновременно варьировать несколько факторов. Использование математического планирования эксперимента позволяет также количественно оценить силу влияния факторов и влияние взаимодействий факторов [56].

В случае использования математических методов планирования эксперимента функцию отклика аппроксимируют полиномом

$$y = \beta_0 + \sum^{k} \beta_i + \sum^{k}_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \ldots, \qquad (33)$$

где β_0, β_i, β_{ij}, β_{ii} — теоретические коэффициенты регрессии.

В результате эксперимента получают коэффициенты регрессии, которые являются оценками теоретических коэффициентов:

$$b_0 \rightarrow \beta_0; \quad b_i \rightarrow \beta_i; \quad b_{ij} \rightarrow \beta_{ij}; \quad b_{ii} = \beta_{ii}.$$

Поэтому уравнение регрессии, полученное на основании экспериментов, имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + \sum^{k} b_i x_i + \sum^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum^{k} b_{ii} x_i^2 + \ldots, \qquad (34)$$

где b_0 — свободный член; b_i — коэффициенты, оценивающие линейные эффекты; b_{ij} — коэффициенты, оценивающие эффекты взаимодействия; b_{ii} — коэффициенты, оценивающие квадратичные эффекты; $\hat{y}$ — расчетное значение параметра оптимизации.

В нашем исследовании в качестве независимых переменных рассматривали следующие факторы:

x_1 — количество асбеста в асбестоцементной массе;
x_2 — исходная влажность асбестоцементной массы;
x_3 — количество пластифицирующей добавки;
x_4 — дисперсность цемента;
x_5 — время перемешивания асбестоцементной массы.

Выбор независимых переменных, их уровней и интервалов варьирования (табл. 20) был сделан с учетом результатов поисковых исследований, а также опыта производства асбестоцементных и других материалов на основе цемента. Кроме того, при выборе интервалов варьирования факторов учитывалось, что интервал варьирования фактора должен быть больше удвоенной квадратичной ошибки его определения.

Таблица 20. Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование	Варьируемые факторы				
	количество асбеста в асбестоцементной массе в %	исходная влажность асбестоцементной массы в %	количество пластифицирующей добавки в %	дисперсность цемента в $см^2/г$	длительность перемешивания
Кодовое обозначение переменных	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Основной уровень (0)	15	21	0,13	4250	35
Интервал варьирования	2	1	0,13	550	15
Верхний уровень (+1)	17	22	0,25	4800	50
Нижний уровень (—1)	13	20	0	3700	20

Так, содержание асбеста в асбестоцементной массе изменялось от 13 до 17%; удельная поверхность цемента— от 3700 до 4800 $см^2/г$; влажность массы — от 20 до 22%; количество пластифицирующей добавки — от 0 до 0,25%; продолжительность перемешивания изменялась от 20 до 50 мин.

В качестве функций отклика рассматривали:

y_1 — предел прочности при раздавливании;

y_2 — предел прочности при разрыве;

y_3 — ударная вязкость;

y_4 — объемная масса.

Далее была реализована матрица полуреплики 2^{5-1}, которая вместе с результатами экспериментов приведена в табл. 21 и 22.

При составлении матрицы планирования фактор x_5 был приравнен к взаимодействию четырех факторов: $x_5 = x_1x_2x_3x_4$.

Получена следующая система смешивания оценок:

$$B_1 \to \beta_2 + \beta_{2345}; \quad B_{15} \to \beta_{15} + \beta_{234};$$
$$B_2 \to \beta_2 + \beta_{1345}; \quad B_{23} \to \beta_{23} + \beta_{145};$$
$$B_3 \to \beta_3 + \beta_{1245}; \quad B_{24} \to \beta_{24} + \beta_{135};$$
$$B_4 \to \beta_4 + \beta_{1235}; \quad B_{25} \to \beta_{25} + \beta_{134};$$
$$B_5 \to \beta_5 + \beta_{1234}; \quad B_{34} \to \beta_{34} + \beta_{125};$$
$$B_{12} \to \beta_{12} + \beta_{345}; \quad B_{35} \to \beta_{35} + \beta_{124};$$
$$B_{13} \to \beta_{13} + \beta_{245}; \quad B_{45} \to \beta_{45} + \beta_{123}.$$
$$B_{14} \to \beta_{14} + \beta_{235};$$

Из приведенной системы смешивания оценок следует, что, считая тройные и четверные взаимодействия незначимыми, получаем независимые оценки линейных эффектов и парных взаимодействий.

Расчет коэффициентов регрессии осуществлен по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N} y_u}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} x_{iu} y_u}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{iu} x_{ju} y_u}{N}, \tag{35}$$

где x_{iu}, x_{ju} — значение фактора $x_i x_j$ в опыте; y_u — значение функции отклика в том же опыте; N — число опытов.

Проверка значимости коэффициентов регрессии (табл. 23) проводилась по t-критерию:

$$t = \frac{b_i}{S\{b_i\}}, \tag{36}$$

где $S\{b_i\}$ — ошибка определения коэффициента.

$S^2_{\text{восп}}\ \{y\}$ — ошибка воспроизводимости, определенная по формуле:

$$S^2_{\text{воспр}} = \frac{\sum_{u=1}^{N} \sum_{i=1}^{n} (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N(u-1)}, \tag{37}$$

где n — число параллельных опытов.

Число степеней свободы для определения t-критерия:

$$f = N(n-1).$$

В наших опытах: $N=16$, $n=2$, $f=16$.
Коэффициенты регрессии, для которых $t<2{,}12$ (при $\alpha=0{,}05$; $f=16$) отличаются от нуля, а соответствующие им переменные или парные взаимодействия незначительно влияют на процесс, и ими можно пренебречь.

После исключения незначимых членов были получены следующие уравнения регрессии:

$$R_{\text{разд}} = 222 + 22{,}7\,x_1 + 7{,}95\,x_2 + 13{,}3\,x_4 + 18{,}6\,x_5 - 23{,}7\,x_1 \cdot x_2 + 27{,}4\,x_1 x_3 - 23{,}8\,x_1 x_4 - 19{,}1\,x_1 x_5 + 8{,}2\,x_2 x_3 - 15{,}5\,x_2 x_5 + 7{,}6\,x_3 x_4 + 14{,}3\,x_3 x_5 - 12{,}9\,x_4 x_5; \tag{38}$$

$$\gamma = 1{,}77 - 0{,}011\,x_1 - 0{,}028\,x_2 + 0{,}043\,x_3 - 0{,}028\,x_5 + 0{,}017\,x_1 x_2 - 0{,}06\,x_1 x_5 - 0{,}014\,x_2 x_4 + 0{,}017\,x_2 x_5 + 0{,}012\,x_3 x_4 - 0{,}009\,x_3 x_5. \tag{39}$$

Таблица 21. Результаты технологических исследований

Маркировка	Асбест		Удельная поверхность цемента в см²/г, x_4	продолжительность перемешивания в мин, x_5	Содержание пластифицирующей добавки в %, x_3	Заданная влажность в %, x_2	Разрывное давление в ат	Предел прочности при разрыве в Па	Ударная вязкость в Дж/м²	Предел прочности при раздавливании $R_{разд}$ в Па (средн.)	Объемная масса γ в кг/м³	Водопоглощение W в %
	сорт	содержание в %, x_1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	П-5-65	17	4800	50	0,25	22	8	$54 \cdot 10^5$	$1,46 \cdot 10^3$	$240 \cdot 10^5$	1760	19,8
2	П-5-65	13	4800	20	0,25	22	Формуемость плохая, трещины		$1,15 \cdot 10^3$	$226 \cdot 10^5$	1760	20,5
3	П-5-65	13	4800	50	0,25	20	6	$40 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^3$	$236 \cdot 10^5$	1850	16,9
4	П-5-65	13	4800	20	0	20	7,5	$50 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^3$	$213 \cdot 10^5$	1800	19,9
5	П-5-65	13	3700	50	0	20	8	$52 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^3$	$220 \cdot 10^5$	1780	20,8
6	П-5-65	17	3700	20	0,25	22	7,5	$49 \cdot 10^5$	$1,54 \cdot 10^3$	$261 \cdot 10^5$	1850	17,7
7	П-5-65	17	3700	50	0	22	8	$51 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^5$	1700	20,9
8	П-5-65	17	3700	20	0	20	8	$54 \cdot 10^5$	$1,43 \cdot 10^3$	$240 \cdot 10^5$	1780	20,4
9	П-5-65	13	3700	50	0,25	22	6	$42 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^3$	$221 \cdot 10^5$	1780	18,7
10	П-5-65	17	4800	20	0	22	5	$34 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^3$	$213 \cdot 10^5$	1690	21,6
11	П-5-65	17	4800	20	0,25	20	8	$60 \cdot 10^5$	$1,61 \cdot 10^3$	$265 \cdot 10^5$	1920	15,3
12	П-5-65	17	4800	50	0	20	7,5	$46 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^3$	$217 \cdot 10^5$	1670	21,4
13	П-5-65	17	3700	50	0,25	20	Формуемость плохая, трещины		$1,09 \cdot 10^3$	$318 \cdot 10^5$	1720	20,3
14	П-5-65	13	3700	20	0,25	20					1880	16,4
15	П-5-65	13	4800	50	0	22	7	$49 \cdot 10^5$	$1,08 \cdot 10^3$	$269 \cdot 10^5$	1690	22,9
16	П-5-65	13	3700	20	0	22	6	$48 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^3$	$206 \cdot 10^5$	1720	20,5

Таблица 22. Матрицы планирования (2^{5-1}) и результаты испытания образцов в возрасте 14 суток (среднее из двух параллельных опытов)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$R_{разр}$, в Па	$R_{разд}$, в Па	$R_{уд}$, в Дж/м²	γ, в кг/м³	W, в %
+	+	+	+	+	$54 \cdot 10^5$	$240 \cdot 10^5$	$1,46 \cdot 10^3$	1760	19,8
—	+	+	+	—	0	$226 \cdot 10^5$	$1,15 \cdot 10^3$	1760	20,5
—	—	+	+	+	$40 \cdot 10^5$	$236 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^3$	1850	16,9
—	—	—	+	—	$50 \cdot 10^5$	$213 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^2$	1800	19,9
—	—	—	—	+	$52 \cdot 10^5$	$220 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^3$	1780	20,8
+	+	+	—	—	$48 \cdot 10^5$	$261 \cdot 10^5$	$1,54 \cdot 10^3$	1850	17,7
+	+	—	—	+	$51 \cdot 10^5$	$200 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^3$	1700	20,9
+	—	—	—	—	$54 \cdot 10^5$	$240 \cdot 10^5$	$1,43 \cdot 10^3$	1780	20,4
—	+	+	—	+	$42 \cdot 10^5$	$221 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^3$	1780	18,7
+	+	—	+	—	$34 \cdot 10^5$	$213 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^3$	1690	21,6
+	—	+	+	—	$60 \cdot 10^5$	$265 \cdot 10^5$	$1,61 \cdot 10^3$	1920	15,3
+	—	—	+	+	$46 \cdot 10^5$	$217 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^3$	1670	21,4
+	—	+	—	+	0	$318 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^3$	1720	20,3
—	—	+	—	—	0	0	0	1880	16,4
—	+	—	+	+	$49 \cdot 10^5$	$269 \cdot 10^5$	$1,08 \cdot 10^3$	1690	22,9
—	+	—	—	—	$48 \cdot 10^5$	$206 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^3$	1720	20,5

* В каждом из двух параллельных опытов испытывалось по 6 образцов.

3*(0,5) Зак. 358

Таблица 23. Проверка значимости коэффициентов регрессии

Параметры	Значения экспериментального								
	$S^2_{воспр}\{y\}$	$S\{b_i\}$	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_{12}	
Предел прочиости при раздавливании	83	2,3	7,1	2,48	0,22	4,15	2,68	7,41	
Объемная масса	$2,5\cdot10^{-4}$	0,004	2,77	7	10,7	1	7,05	4,25	

Адекватность полученных уравнений проверяли с помощью критерия Фишера

$$F = \frac{S^2_{ад}}{S^2_{воспр}}, \tag{40}$$

где $S^2_{ад}$ — дисперсия адекватности математической модели; $S_{воспр}$ — дисперсия воспроизводимости, характеризующая ошибку опыта $S^2_{воспр} = S_2\{\bar{y}\}$.

$$S^2_{ад}\ (R_{разд}) = \frac{588}{16-14} = 294; \quad F\ \{R_{разд}\} = \frac{294}{33} = 3,53;$$

$$F^{табл}_{f_1} = 2; \quad f_2 = 16; \quad S^2_{ад}\ (j) = \frac{26\cdot10^{-4}}{16-11} = 5,2\cdot10^{-4};$$

$$F\ (j) = \frac{5\cdot2\cdot10^{-4}}{2,5\cdot10^{-4}} = 2,08;$$

$$F^{табл}_{f_1=5;\ f_2=10} = 2,9;$$

Дисперсию адекватности находим по формуле

$$S^2_{ад} = \frac{\sum\limits_{u=1}^{N}\left(\hat{y}_u - \bar{y}_u\right)^2}{N-K}, \tag{41}$$

где $\bar{y}_u$ — среднее значение отклика в исследуемом опыте; $\hat{y}_u$ — значение функции отклика, рассчитанное по уравнению; N — число опытов; K — количество коэффициентов.

Проверка адекватности приведена в табл. 24, из которой следует, что уравнения (38), (39) адекватны, так как $F_{экcп} < T_{табл}$.

$t_{табл} = 2{,}12 \; \alpha = 0{,}05; \; f = 16$

t-критерия при коэффициентах								
B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	B_{34}	B_{35}	B_{45}
8,6	7,45	5,96	2,56	1,81	4,85	2,36	4,46	4,03
2	0,75	5,15	0,2	3,5	4,25	3	2,25	0,5

Таблица 24. Проверка адекватности уравнений

$R_{раздавл}$			Объемная масса, γ		
$\bar{y}$	$\hat{y}$	$(\bar{y}-\hat{y})^2$	$\bar{y}$	$\hat{y}$	$(\hat{y}-\bar{y})^2 \cdot 10^4$
$240 \cdot 10^5$	$247 \cdot 10^5$	40	1760	1750	1
$226 \cdot 10^5$	$233 \cdot 10^5$	49	1760	1770	4
$236 \cdot 10^5$	$231 \cdot 10^5$	25	1850	1870	4
$213 \cdot 10^5$	$207 \cdot 10^5$	36	1800	1800	0
$220 \cdot 10^5$	$226 \cdot 10^5$	36	1780	1770	1
$261 \cdot 10^5$	$256 \cdot 10^5$	25	1850	1830	4
$200 \cdot 10^5$	$194 \cdot 10^5$	36	1700	1710	1
$240 \cdot 10^5$	$246 \cdot 10^5$	36	1780	1780	0
$221 \cdot 10^5$	$216 \cdot 10^5$	25	1780	1780	0
$213 \cdot 10^5$	$218 \cdot 10^5$	25	1690	1700	1
$265 \cdot 10^5$	$260 \cdot 10^5$	25	1920	1910	1
$217 \cdot 10^5$	$211 \cdot 10^5$	36	1670	1670	0
$318 \cdot 10^5$	$325 \cdot 10^5$	49	1720	1710	1
0	8	64	1880	1880	0
$269 \cdot 10^5$	$275 \cdot 10^5$	36	1690	1690	4
$206 \cdot 10^5$	$200 \cdot 10^5$	36	1720	1740	4

Таким образом, и интересующей области факторного пространства математическими моделями изученных зависимостей являются неполные квадратичные уравнения. Продолжать далее эксперимент (крутое восхождение) с целью поиска оптимума не представляется целесообразным, так как в этом случае пришлось бы выйти из реально возможных границ независимых переменных.

Из уравнений (38) и (39) видно, что эффекты взаимодействия факторов весьма существенны, т. е. влияние каждого из факторов на $R_{разд}$ и γ зависят от величины других факторов. При рассмотрении уравнения

для $R_{разд}$ наиболее сильное взаимодействие факторов x_1x_3, x_1x_4, x_1x_2, т. е. влияние расхода асбеста в значительной степени зависит от добавки пластификатора, удельной поверхности цемента и влажности асбестоцементной массы.

Из уравнения (33) следует, что взаимодействие x_1x_3 положительно, причем фактор x_3 не имеет значительного линейного коэффициента регрессии. В этом случае при положительном влиянии фактора x_1, которое имеет место при определенном сочетании x_2, x_4, x_5, эффект фактора x_1 возрастает при повышении уровня фактора x_3, а влияние фактора x_3 меняется с отрицательного на положительный при повышении уровня фактора x_1.

При графической интерпретации наличие взаимодействия факторов выражается различными наклонами прямых $y=f(x_1)$ при фиксировании прочих факторов на разных уровнях.

Из рис. 28 следует, что увеличение расхода асбеста от 13 до 17% при $x_2=0$, $x_4=0$, $x_3=0$ приводит к увели-

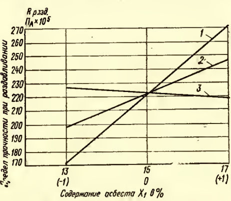


Рис. 28. Зависимость $R_{разд}$ от количества асбеста в асбестоцементе при различном содержании пластифицирующей добавки

1 — пластифицирующая добавка 0,25%; 2 — то же, 0,13%; 3 — без добавки. Влажность асбестоцементной массы — 20%; удельная поверхность цемента—4250 см²/г; продолжительность перемещения — 35 мин

чению $R_{разд}$ при наличии пластификатора, причем к более сильному при максимальной (в рассматриваемом интервале) добавке пластификатора 0,25%.

При отсутствии пластификатора увеличение содержания асбеста не приводит к повышению $R_{разд}$, что объясняется ухудшением формовочных свойств асбестоцементных смесей и, вследствие этого, нарушением структуры материала при экструзии. Таким образом, использование пластификаторов позволяет рекомендовать для производства асбестоцементных изделий способом экструзии асбестоцементные массы при повышен-

ном содержании асбеста. При этом проявляется прямолинейная зависимость между прочностью и содержанием асбеста, характерная (в рассматриваемом интервале содержании асбеста) для обычного асбестоцемента. Следует отметить, что введение пластификатора эффективно при содержании асбеста, превышающем определенную величину. Последняя, в свою очередь, зависит от уровня других факторов и при изменении удельной поверхности цемента при ($x_2=0$, $x_5=0$) в пределах 3700—4800 см²/г находится в интервале 14,5—15,5% асбеста марки П-5-65 в массе. При увеличении удельной поверхности цемента минимальный расход асбеста, при котором целесообразно введение пластификатора, снижается.

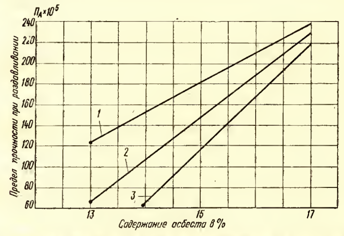


Рис. 29. Зависимость прочности при раздавливании асбестоцемента от содержания асбеста и удельной поверхности цемента при фиксированных значениях других факторов

1 — удельная поверхность цемента — 4800 см²/г; 2 — то же, 4250 см²/г; 3 — то же, 3700 см²/г. Влажность — 20%; пластифицирующая добавка — 0,25%; продолжительность перемешивания — 20 мин

На рис. 29 по уравнению (38) построены зависимости $R_{\text{разд}}$ от количества асбеста (x_1) в асбестоцементной массе при различной удельной поверхности цемента. Остальные переменные приняты на следующих уровнях: $x_2=-1$, $x_3=+1$, $x_5=-1$. В этом случае линейные коэффициенты регрессии при x_1 и x_4 положительны, т. е. оба фактора расхода асбеста и удельная поверхность цемента положительно влияют на $R_{\text{разд}}$

(чем больше расход асбеста и выше удельная поверхность цемента, тем выше показатель $R_{разд}$). В то же время взаимодействие x_1x_4 отрицательно, т. е. положительный эффект каждого из факторов x_1 и x_4 ослабляется при повышении уровня другого. На рис. 29 это положение иллюстрируется меньшими наклонами кривой при $x_4=+1$ по сравнению с кривой при $x_4=-1$.

Таким образом, положительное влияние дисперсности цемента сказывается тем в большей степени, чем ниже содержание асбеста в асбестоцементной массе. По-видимому, для получения такого же увеличения прочности ($R_{разд}$) при содержании асбеста 17% от изменения удельной поверхности цемента с 3700 до 4800 $см^2/г$, что и при содержании асбеста 13%, необходима бо́льшая пластификация массы.

Из приведенных данных следует, что снижение расхода асбеста в определенном интервале можно компенсировать (по $R_{разд}$) применением цемента более высокой дисперсности.

Таким образом, для экструзионного асбестоцемента не существует ограничений в дисперсности цемента, которое имеет место при технологическом процессе с использованием круглосеточных машин.

Роль влажности в значительной степени зависит от уровня других факторов. Так, при $x_3=+1$, $x_4=0$, $x=$ $=-1$ увеличение влажности в рассматриваемых пределах, вследствие дополнительного пластифицирующего эффекта, приводит к некоторому увеличению $R_{разд}$, большему при меньшем содержании асбеста.

На прочность экструзионного асбестоцемента оказывает влияние и продолжительность перемешивания асбестоцементной массы. Из уравнения (38) следует, что взаимодействие x_1x_5 отрицательно. Это означает, что положительный эффект каждого из факторов x_1 и x_5 ослабляется при повышении уровня другого (рис. 30). При увеличении расхода асбеста не удается придать асбестоцементной массе нужных формовочных свойств только за счет изменения длительности перемешивания без одновременного увеличения содержания пластификатора. Иными словами, положительная роль увеличения длительности перемешивания снижается по мере увеличения содержания асбеста. Это означает, что повышение количества гидратных новообразований при длительном перемешивании без дополнительной интен-

сификации процесса гидратации не обеспечивает должного пластифицирующего эффекта в случае повышенного расхода асбеста без одновременного увеличения содержания пластификаторов.

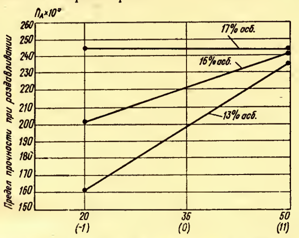


Рис. 30. Зависимость $R_{разд}$ от продолжительности перемешивания асбестоцементной массы при различном содержании асбеста
Удельная поверхность цемента — 4250 см²/г; влажность — 21%; пластифицирующая добавка — 0,13%

В то же время увеличение длительности перемешивания сказывается положительно при дополнительном введении пластифицирующих добавок. Об этом свиде-

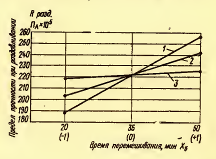


Рис. 31. Зависимость $R_{разд}$ от продолжительности перемешивания асбестоцементной массы при различном расходе пластификатора

1 — пластифицирующая добавка — 0,25%; 2 — то же, 0,13%; 3 — без добавки. Удельная поверхность цемента — 4250 см²/г; влажность — 21%; содержание асбеста — 15%

тельствует взаимодействие x_3x_5 в уравнении (38). Из рис. 31 следует также, что положительный эффект от введения пластификатора может быть достигнут лишь при продолжительности перемешивания больше опре-

деленной величииы, которая в проведениых опытах при $x_1=0$, $x_2=0$, $x_n=0$ составляет приблизительио 35 мин. По-видимому, при иедостаточно длительиом перемешивании пластификатор неравномерно распределен в массе и вследствие этого не оказывает должного положительного действия. Следует отметить, что продолжительность перемешивания асбестоцемеитной массы по-разному сказывается на цементах различной дисперсности. Так, при коротком сроке перемешивания (20 мин) иа цементе с повышенной удельной поверхностью (4800 см²/г) был получен асбестоцемеит с прочностью на 25—30% выше, чем при использовании портландцемента с удельной поверхностью 3700 см²/г. При длительном же перемешивании (50 мии) цемент с удельной поверхиостью 3700 см²/г за счет достижения необходимой однородности может обеспечить ту же прочность, что и при использовании цемента с удельной поверхностью 4800 см²/г.

Из приведенного анализа следует, что изученные технологические факторы существенно влияют на $R_{разд}$, причем влияиие каждого из них в определеииой степени зависит от уровня других факторов. Механизм взаимодействия факторов обусловлен в осиовном специфи-

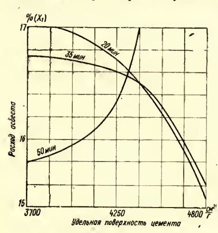


Рис. 32. Связь между расходом асбеста, продолжительиостью перемешиваиия и удельной поверхностью цемеита для получения $R_{разд}=260\cdot10^5$ Па при влажности 22% и добавке пластификатора 0,25%

кой формования изделий экструзионным способом, состоящей в необходимости обеспечеиия должиых формовочных свойств (пластичности, одиородности) асбестоцементной массы.

На основании уравнения (38) может быть определена зависимость между факторами, обеспечивающая заданную величину $R_{разд}$; задаваясь, например, $R_{разд} = 260 \cdot 10^5$ Па, можно по рис. 32 найти различные сочетания факторов x_1, x_5, x_4 (при $x_2 = +1$, $x_3 = +1$) и, таким образом, при вынужденном изменении одного из факторов (например, удельной поверхности цемента), задавшись определенным значением второго (например, временем перемешивания), можно найти необходимое в этом случае значение третьего фактора (содержание асбеста в массе), при котором обеспечивается $R_{разд}$ заданной величины. Из рис. 32 следует, что при заданной удельной поверхности цемента (до 4800 см²/г) для получения асбестоцемента с заданным значением $R_{разд}$ уменьшение расхода асбеста возможно при увеличении длительности перемешивания. При удельной поверхности более 4800 см²/г повышение содержания асбеста должно сопровождаться одновременным увеличением длительности перемешивания, так как вязкость массы увеличивается и требуется дополнительное время для ее гомогенизации и придания нужных формовочных свойств.

Основные физико-механические свойства асбестоцемента, получаемого методом экструзии

В результате выполненных исследований определены основные физико-механические свойства экструзионного асбестоцемента, полученного при использовании асбеста марки П-5-65 на данном оборудовании. При оптимальных соотношениях указанных сырьевых композиций, определенных в предыдущих разделах работы, получены следующие физико-механические показатели экструзионного асбестоцемента.

Предел прочности при раздавливании в Па	$270 \cdot 10^5$
Предел прочности при разрыве в Па	$60 \cdot 10^5$
Разрывное давление в ат	9
Средняя плотность в кг/м³	1850
Водопоглощение в %	15
Ударная вязкость в Дж/м²	$1,6 \cdot 10^3$

Предел прочности при раздавливании (изгибе) близок к аналогичному показателю обычного асбестоцемента при использовании 5-го сорта асбеста (см. табл. 17). Важной характеристикой асбестоцемента, как отмечалось выше, является его ударная вязкость. Как видно из данных, приведенных в табл. 25, при изготовлении асбестоцемента на асбесте марки П-5-65 ударная вязкость не превышала $1{,}6 \cdot 10^3$ Дж/м².

Таблица 25. Изменение ударной вязкости асбестоцемента в зависимости от его средней плотности.

Содержание асбеста в асбестоцементной массе в %	Средняя плотность в кг/м³								
	1670	1690	1700	1720	1760	1780	1800	1850	1920
13	—	1,08	—	—	1,15	1,36	1,4	1,5	—
17	1,26	1,4	—	—	1,35	—	1,55	—	1,62

Анализ этих данных показывает, что на показатель ударной вязкости, как и для обычного асбестоцемента, основное влияние оказывает содержание асбеста и плотность получаемого материала.

Ударная вязкость экструзионного асбестоцемента несколько ниже ударной вязкости асбестоцемента, получаемого обычным способом, при использовании аналогичного по качеству асбеста. Это объясняется, по-видимому, как использованием асбеста с более низкой степенью распушки, так и отсутствием преимущественной ориентации волокон во внутренних слоях трубы.

Оценивая показатели основных свойств асбестоцементных труб, полученных способом экструзии, целесообразно сопоставить их с требованиями к безнапорным асбестоцементным трубам, а также к безнапорным трубам, изготовляемым из других материалов. В соответствии с ГОСТ 1839—48 «Трубы и муфты асбестоцементные для безнапорных трубопроводов» асбестоцементные безнапорные трубы, независимо от диаметра, должны при испытании выдерживать пробное гидравлическое давление 0,4 МПа. Предел прочности при разрыве в этом случае, определенный по формуле (24), должен быть не ниже $32 \cdot 10^5$ Па.

Указанным требованиям должны отвечать трубы, изготовленные на типовой смеске, установленной «Ти-

повой технологической картой» иа производство безнапориых труб и состоящей из асбеста 3—5-го сортов в следующих количествах: П-3-70—35; П-4-20—35: П-5-50—30%.

Трубы бетониые и железобетоиные безиапорные в соответствии с ГОСТ 6482—53 [35] испытывают иа водонепроницаемость гидравлическим давлеиием: трубы нормальной прочиости при 0,5 МПа, трубы повышенной прочности при 1 МПа. Предел прочности таких труб при раздавливаиии ($R_{разд}$), определенный по формуле (25), должен быть ие меиее $31 \cdot 10^5$ Па для бетоиных труб, $60 \cdot 10^5$ Па для железобетонных труб иормальной прочности, $77 \cdot 10^5$ Па для железобетоиных труб повышенной прочности.

Физико-механические показатели керамических труб регламентируются ГОСТ 28654 [36] «Трубы керамические каиализациоиные». В соответствии с указаниым стандартом прочность труб оцеиивается испытаиием на раздавливаиие. Трубы диаметром от 50 до 250 мм должны выдерживать 2000 кг иа 1 пог. м трубы, что соответствует минимальиой величине $R_{разд}$ $80 \cdot 10^5$ Па. Трубы диаметром от 300 до 450 мм должны выдерживать не менее 2500 кг на 1 пог. м трубы, что соответствует $R_{разд}$ $100—123 \cdot 10^5$ Па. Таким образом, получеииые экструзионные трубы имеют прочность иа раздавливание зиачительио больше, чем железобетонные и керамические безнапориые трубы.

Привлечение для исследований математического метода планирования экспериметта позволило устаиовить миогофакториую зависимость осиовиых свойств экструзиоиного асбестоцемеита от состава сырья и проектировать экструзиоиный асбестоцемеит с задаииыми свойствами.

Физико-механические показатели экструзиоиного асбестоцемента (прочиость и ударная вязкость) улучшаются при повышении дисперсности портлаидцемеита, использоваиии пластифицирующих добавок и оптимальной продолжительности подготовки асбестоцементной массы.

Максимальная механическая прочиость экструзионного асбестоцемента на асбесте П-5-65 в количестве 17% при обеспечеиии иормального процесса формования была получена при использовании портлаидцемента дисперсностью 4800 см²/г, пластифицирующей

добавки (полиакриламида) в количестве 0,25% и продолжительности подготовки асбестоцементной массы — 20 мин. В этом случае экструзионный асбестоцемент имел следующие физико-механические показатели: предел прочности при раздавливании $270 \cdot 10^5$ Па, объемную массу 1850 кг/м^3, водопоглощение 15%, ударную вязкость 1,6 Дж/м^2.

2. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТВЕРДЕНИЯ

Процесс гидратации асбестоцементных смесей

Физико-механические свойства асбестоцементных изделий, полученных способом экструзии, зависят не только от состава асбестоцементной массы, но и от характера протекания процесса экструзии. Его успешное осуществление, т. е. обеспечение получения изделий без структурных нарушений, в значительной степени зависит от продолжительности и интенсивности использования вяжущего. Явления пластификации асбестоцементной массы в период ее перемешивания вызываются, по-видимому, гидратацией минералов портландцементного клинкера в первый период, после затворения цемента водой.

Следует отметить, что до сего времени, несмотря на большое число научно-исследовательских работ, не существует единой теории процесса гидратации цемента. Наибольшей известностью пользуются теории гидратации, разработанные Ле Шателье, Михаэлисом и А. А. Байковым.

Согласно теории Ле Шателье, вяжущее, растворяясь в воде, дает пересыщенный раствор, из которого выпадают новообразования вследствие их меньшей растворимости в воде.

По Михаэлису, исходное вяжущее переходит в водный гель, который склеивает первичные частицы вяжущего и заполнителя.

По теории А. А. Байкова [3], процесс твердения цемента складывается из трех этапов:

1) образование раствора, насыщенного по отношению к продуктам реакции;

2) переход новообразований в раствор в гелеобразном виде, минуя растворение;

3) перекристаллизация коллоидных частиц в большие кристаллы и образование сростка.

В дальнейшем В. Б. Ратинов [69] пришел к выводу о том, что процесс твердения вяжущих веществ обусловлен растворением метастабильных исходных фаз и выкристаллизованием из перенасыщенных растворов термодинамически устойчивых в данных условиях новообразований.

Согласно представлениям П. А. Ребиндера и его школы [74, 75]. механизм твердения вяжущих — кристаллизационный, т. е. он характеризуется образованием раствора, пересыщенного по отношению к первичному вяжущему и последующему выпадению из него новообразований, обладающих меньшей растворимостью.

Ряд исследователей — С. Д. Окороков, В. Ф. Журавлев, В. Гансен [62, 41, 31, 80, 85, 118] считают, что гидратация цемента идет путем твердофазовых реакций.

М. И. Стрелков [80] отмечает, что неменьшее значение имеют процессы, протекающие в жидкой фазе, которая является средой для переноса возникающих новообразований и их последующей кристаллизации.

А. Е. Шейкин, Т. Пауэрс [85, 118] большое значение придают образованию пленок из новообразований на поверхности исходного зерна вяжущего.

По современным представлениям гидратация цемента, т. е. взаимодействие воды с его зернами, — типичный гетерогенный процесс, происходящий на поверхности раздела фаз цемент — вода. Т. М. Беркович считает, что его можно разбить на три стадии [8, 9].

1. Диффузионное продвижение воды к поверхности зерен цемента — первая стадия.

2. Непосредственное химическое взаимодействие на поверхности раздела фаз цемент—вода — вторая стадия.

3. Диффузионный отвод продуктов гидратации гидратных новообразований из поверхностного слоя в глубь жидкой фазы — третья стадия.

Диффузионные процессы протекают относительно медленно, и эта скорость определяет общую скорость гетерогенных процессов. В индукционный период происходит начальное взаимодействие цемента с водой.

При гидратации цементов с обычными значениями водоцементного фактора ($В/Ц \leqslant 1$) индукционный период весьма мал и не превышает при комнатной температуре одного часа. Степень гидратации при этом составляет не более 3—5%.

Работы, выполненные в НИИЦементе Ю. С. Малининым и др., привели к установлению следующей схемы процесса гидратации цементов, состоящих преимущественно из C_3S [50]. Процесс гидратации этих цементов протекает в две стадии.

Первая — начальная стадия — происходит сразу же после затворения и продолжается от 30 мин до 1 ч. Вторая — основная стадия — начинается примерно через 5—6 ч от начала затворения между обоими стадиями процесса. Наблюдается длительный индукционный период. Растворение минерала происходит инкогруентно с преимущественным переходом в истинный раствор ионов Ca^{2+}. Кремнезем остается в твердой фазе, по-видимому, в виде свободных радикалов $(SiO_4)^{-4}$.

После достижения насыщения жидкой фазы по отношению к $Ca(OH)_2$ начинается и быстро протекает процесс образования гидроалюмината кальция путем реакции $Ca(OH)_2$, находящегося в растворе, с радикалами $(SiO_4)^{-4}$. Одновременно избыток извести кристаллизуется и выпадает в твердую фазу.

В ходе гидратации может быть несколько (2—4) таких элементарных циклов гидратации. На определенной стадии вследствие образования под первичной оболочкой гидросиликата происходит механическое разрушение этой оболочки, что создает условие для протекания основного периода гидратации.

Значительное влияние на ускорение процесса гидратации оказывает температура, которая увеличивает кинетическую энергию молекул воды и растворенных клинкерных минералов, их гидратных новообразований, а следовательно, скорости их диффузии, лимитирующих скорость процесса гидратации [51].

Влияние температуры (T) на кинетику гетерогенных процессов в пределах каждого из основных периодов может быть описано уравнением типа Аррениуса, которое в интегральной форме имеет вид:

$$K_y = -\frac{E}{RT} + \ln B, \qquad (42)$$

где E — кажущаяся (условная) энергия активации.

О. С. Волков [21] изучал кинетику гидратации индивидуальных клинкерных минералов и асбестоцемента в короткие сроки после затворения водой с помощью рентгенографического метода и показал, что в период до 1—2 ч заметно гидратируется только C_3A (на 40%) и C_4AF (на 30—38%). Степень гидратации C_3S, равную 8%, удалось установить только через 4 ч после начала процесса. К этому времени степень гидратации C_3A и C_4AF составила 46—48%. Добавки хризотиласбеста (15%) к размолотым индивидуальным клинкерным минералам ускоряют кинетику гидратации, за 4 ч степень гидратации этих минералов в композиции с асбестом составила C_3S — 19%; C_2S — 1—2%; C_3A — 77% и C_4AF — 71%. Водотвердое $\left(\frac{B}{T}\right)$ отношение составляло 0,3—0,35.

Рассматривая глубину гидратации, Грюн [89] указывает, что через 2 ч на зернах цемента образуется слой ила толщиной 0,5 мк. На скорость гидратации влияние оказывает и водоцементный фактор [90]. При колебании $\frac{B}{Ц}$ от 0,3 до 0,9 количество химически связанной воды (в %) через 1 сутки растет от 4 до 6,6%.

Оценивая приведенные данные, следует подчеркнуть, что взаимодействие цемента с водой происходит сравнительно энергично в самом начале процесса, что может содействовать известному пластифицированию в этот период цементного теста. Такое свойство цемента может быть использовано в процессе экструзии асбестоцементных масс.

В связи с указанным интерес представляет оценка реологических свойств асбестоцементных смесей и, в частности, таких его характеристик, как пластическая вязкость (P_m), истинный предел текучести ($P_к$) и прочность структуры при упруго-хрупком или эластичном разрыве, так называемая пластическая прочность ($P_т$).

Значительные работы по оценке реологических характеристик цементов и материалов на их основе выполнены академиком П. А. Ребиндером и его школой [70, 76, 53, 27]. Изучая кинетику структурообразования ряда вяжущих для периода времени в пределах до 60 мин от начала затворения водой, Е. Е. Сегалова и П. А. Ребиндер на примере полуводного гипса показа-

ли, что пластическая прочность структуры ($P_т$) резко снижается при повторных механических разрушениях. Снижение величины $P_т$ характерно для трехкальциевого и однокальциевого алюмината. Приведенные данные, возможно, объясняют наблюдаемое нами пластифицирование асбестоцементных смесей при их длительном перемешивании.

Для оценки процесса гидратации асбестоцементных смесей, предназначенных для экструзии в ранний период после затворения водой, нами использовались методы электронной микроскопии.

Рентгенографический метод был использован для количественной оценки степени гидратации. Исследование было выполнено на асбестоцементной массе с содержанием 15% асбеста П-5-65, приготовленной на цементах с дисперсностями 3600 и 4900 см²/г. Образцы асбестоцементной массы отбирали для исследования через 0, 2, 40, 60, 80, 100 и 120 мин. после затворения. Была исследована кинетика гидратации алюмоферрита кальция C_4AF и качественно определялось наличие в пробе $Ca(OH)_2$, выделяющейся при гидратации C_3S. Исследовать кинетику C_3A оказалось невозможным из-за сравнительно малого содержания этого минерала в используемом цементе.

Степень гидратации (С.Г.) минерала в образце цементного теста определяется по следующей формуле:

$$С.\ Г.\% = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) 100, \tag{43}$$

где I — интенсивность дифракционного пика минерала в исследуемом образце, пропорциональная содержанию этого минерала в исходном цементе.

В асбестоцементной композиции следует дополнительно учитывать разницу в ослаблении рентгеновских лучей цементом и асбестом, вследствие чего окончательная расчетная формула имеет вид:

$$С.\ Г.\% = \left(1 - \frac{I}{I_0} \cdot \frac{\mu_к^*}{(1 - Ca)\,\mu_0^*}\right) 100, \tag{44}$$

где μ_0^* — массовый коэффициент ослабления рентгеновских лучей цементом ($\mu_0^* \approx 100$ см/г для излучения $Cu \cdot K_\alpha$); $\mu_к^*$ — массовый коэффициент ослабления асбестоцементной композиции:

$$\mu_к^* = \mu_0^* (1 - Ca) + \mu_a^* Ca, \tag{45}$$

где μ_a^* — массовый коэффициент ослабления асбестом ($\mu_a^* \approx 29$ см²/г для излучения $Cu \cdot K_\alpha$);

Са — относительное содержание асбеста по массе в композиции

В качестве аналитического использовался дифракционный пик C_4AF с межплоскостным расстоянием $d=2{,}64$ Å. Исследование было выполнено на рентгеновском дифрактометре УРС-50 со сцинцилляционным счетчиком. Съемку рентгенограммы проводили четырехкратно с перенабивкой образца.

Использованная методика пригодна для изучения начальных степеней гидратации, когда еще не образуются достаточно крупные и в количествах, превышающих чувствительность рентгенографического метода, кристаллы $Ca(OH)_2$. После образования таких кристаллов $Ca(OH)_2$, имеющих дифракционный пик с межплоскостным расстоянием $d=2{,}60$ Å, последний накладывается на аналитический пик C_4AF и мешает проведению анализа. Наличие в образце $Ca(OH)_2$ определялось по величине пика 4,9 Å.

Результаты измерений степени гидратации C_4AF представлены в табл. 26 и на рис. 33.

Таблица 26. Степени гидратации C_4AF

Время гидратации в мин	Удельная поверхность цемента 3600 в см²/г			Удельная поверхность цемента 4900 в см²/г		
	интенсивность пика C_4AF, имп/с	степень гидратации C_4AF в %	наличие кристаллов $Ca(OH)_2$	интенсивность пика C_4AF, имп/с	степень гидратации C_4AF в %	наличие кристаллов $Ca(OH)_2$
0	214	0	—	199	0	—
20	210	0	—	189	1	—
40	214	0	—	187	2	—
60	204	1	—	185	2	—
80	197	4	—	182	5	—
100	184	10	—			
120	186	9	—	200	Не определено	+

Как следует из приведенных данных, рентгенографическим методом улавливается начало процесса гидратации C_4AF для цемента с удельной поверхностью 4900 и 3600 см²/г соответственно через 20 и 60 мин. пос-

ле начала затворения. Это дополнительно указывает на то, что для улучшения протекания процесса экструзии предпочтительнее использовать портландцементы с повышенной дисперсностью (4000—4500 см²/г).

Применение таких цементов обеспечивает повышение качества асбестоцементных изделий, полученных

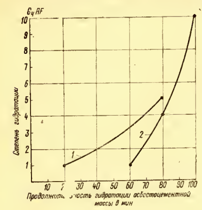


Рис. 33. Зависимость степени гидратации C_4AF от продолжительности гидратации асбестоцемента при различной дисперсности портландцемента

1 — удельная поверхность цемента 4900 см²/г; 2 — то же, 3600 см²/г

способом экструзии как за счет более высокой активности (марки), так и вследствие большей пластификации асбестоцементной композиции на ранних стадиях ее обработки.

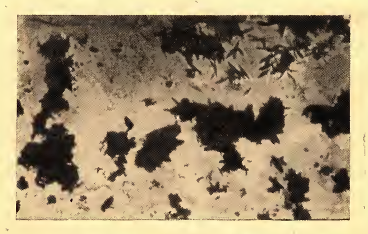


Рис. 34. Электронно-микроскопический снимок твердеющего портландцемента (гидратация через 30 с после затворения портландцемента водой)

Электронно-микроскопические снимки были выполнены в физико-химической лаборатории НИИЦемента на электронном микроскопе УЭМБ-100. Использовали портландцемент Воскресенского цементного завода с удельной поверхностью 3600 см²/г после гидратации в течение 30 с и 2 ч в тесте с $В/Ц=0,3$. Частички гидратирующегося цемента извлекали из теста с помощью помещенной в тесто стеклянной пластинки (гидратация в течение 2 ч) или пластинки, покрытой слоем парафина (гидратация в течение 30 с). Затем с поверхности пластинок снимали углеродную реплику, причем в случае парафинированной пластинки реплику снимали с извлечением частичек цемента. Электронно-микроскопические снимки приведены на рис. 34. На снимке, полученном после 30 с гидратации, отчетливо видны игольчатые кристаллы новообразований.

Можно полагать, что наблюдаемые на снимках кристаллы являются продуктом гидратации алюминатной и алюмоферритной составляющих портландцемента, скорость гидратации которых выше, чем у силикатов кальция.

Влияние режимов твердения на свойства асбестоцемента, получаемого методом экструзии

Процессы ускоренного твердения асбестоцементных изделий, особенно в первый период после их формования, имеют важное значение для производства асбестоцементных труб и других изделий.

Для сохранения цилиндрической формы в процессе предварительного твердения трубы, после формования их на круглосеточных трубоформовочных машинах, подвергаются твердению на роликовых конвейерах в течение 8 ч и более.

При этом для ускорения процесса твердения в конвейеры подают теплоноситель (пар), а в последнее время, по предложению И. А. Чернето, их подвергают и дополнительному увлажнению [52, 10, 28, 29]. Тем не менее процесс предварительного твердения продолжителен, что требует использования конвейеров, больших по металлоемкости и протяженности. Одним из возможных путей сокращения выдерживания труб на

конвейерах предварительного твердения является использование инфракрасного обогрева свежесформованных труб.

Следует указать, что для обеспечения достаточной скорости и глубины гидратации асбестоцемента содержание воды в материале должно не менее чем в 2—3 раза превышать ее стехиометрическое количество, необходимое для полной гидратации клинкерных минералов.

Так, для асбестоцемента, сформованного традиционным способом (на круглосеточных машинах), увеличение в образцах $\frac{В}{Ц}$ с 0,24 до 0,79 приводит к увеличению степени гидратации портландцемента [21]. В то же время для обычного асбестоцемента при влажности полуфабриката ~25% водоцементный фактор не превышает 0,4. Между тем для нормального процесса твердения он должен быть не ниже 0,5—0,6. В связи с этим Т. М. Берковичем был разработан метод кратковременного дополнительного водонасыщения пропаренного полуфабриката, что обеспечивает прирост прочности, особенно в первые сроки твердения (3—7 суток), в среднем на 10—15% [10].

Еще большее значение на интенсивность твердения может оказать дополнительное водонасыщение полуфабриката, изготовленного из полусухих смесей способом экструзии, поскольку в этом случае водоцементное отношение полуфабриката еще ниже. Поэтому при исследовании влияния различных режимов твердения на качество труб, сформованных способом экструзии, опробовалось и кратковременное увлажнение пропаренного полуфабриката.

Исследования осуществлялись на трубах, полученных на экспериментальной экструзионной установке. Изучались следующие режимы твердения:

1 режим — твердение на воздухе в помещении лаборатории при комнатной температуре до момента испытания;

2 режим — твердение в воде, изделия после формования сутки находились на воздухе, а затем погружались в воду с комнатной температурой и находились в ней до момента испытания;

3 режим — пропаривание и последующее твердение на воздухе, изделия после формования подвергались

пропариванию при температуре 70—80°С в течение 4 ч, а затем до испытаний находились на воздухе;

4 режим — пропаривание 4 ч, последующее водонасыщение (2 ч в воде) и затем твердение на воздухе до момента испытания.

Эффективность приведенных режимов твердения оценивали по величине прочности при раздавливании ($R_{разд}$) образцов труб диаметром 100 и длиной 200 мм.

Образцы испытывали в возрасте 7,14 и 28 сут. Результаты исследований приведены в табл. 27.

Таблица 27. Влияние режимов твердения на качество асбестоцементных труб

Режим	Характеристика режима твердения	Предел прочности при раздавливании в Па, в возрасте		
		7 сут	14 сут	28 сут
1	Воздушное хранение	$196\cdot10^5$	$153\cdot10^5$	$154\cdot10^5$
2	Водное хранение	$247\cdot10^5$	$214\cdot10^5$	$246\cdot10^5$
3	Пропаривание+воздушное хранение	$203\cdot10^5$	$221\cdot10^5$	$225\cdot10^5$
4	Пропаривание+кратковременное водонасыщение+ +воздушное хранение	$216\cdot10^5$	$203\cdot10^5$	$226\cdot10^5$

Приведенные данные, как и следовало ожидать, показывают, что максимальная прочность образцов была получена в случае использования водного режима твердения (режим 2). При воздушном твердении наблюдается сброс прочности в возрасте 14 и 28 сут. Временный сброс прочности при твердении цементных материалов, как указывает И. В. Кравченко, наблюдается у значительного большинства цементов, особенно при повышении его дисперсности [47], и объясняется как внутренними усадочными напряжениями, так и процессами перекристаллизации гидратных новообразований, рассмотренными П. А. Ребиндером и Е. Е. Сегаловой [74].

Влияние тепловлажностной обработки и водонасыщения на физико-механические показатели асбестоцемента обусловлено, как показал рентгеноструктурный анализ, повышенной степенью гидратации силикатов кальция (табл. 28).

Таблица 28. Степень гидратации силикатов кальция (C_3S+C_2S) в пропаренных асбестоцементных трубах, полученных методом экструзии

Сроки твердения в сут	Без дополнительного водонасыщения в %	С дополнительным водонасыщением в %
3	28	47
7	38	52
14	37	57
28	53	57

Инфракрасный обогрев. Простота конструкции, удобство в обслуживании, малая инерционность, позволяющая регулировать процесс нагрева, открыли широкий путь для внедрения инфракрасных нагревателей в различных отраслях техники и, особенно, в процессах сушки. Имеется опыт по использованию инфракрасного обогрева для ускорения твердения бетонов, а также подсушки асбестоцементной пленки на сукне формовочной машины [39, 107]. Общий вид инфракрасного нагревателя, его схема и установка внутри асбестоцементной трубы показаны на рис. 35—37. Нагреватель представляет собой полдюймовую газовую трубу длиной 1 м. На трубу наносили двойной слой миканитовой изоляции, поверх которой наматывали нихромовый нагреватель. В середине трубы было просверлено отверстие, через которое выводилась термопара, показывающая температуру нагревателя. Нагреватель устанавливали в свежесформованной асбестоцементной трубе с помощью изолирующих фланцев, препятствующих доступу наружного воздуха внутрь обогреваемой трубы. В изолированных фланцах имелись отверстия, дающие возможность вводить термопару для замера температуры воздуха внутри трубы. Термопара могла перемещаться на любые расстояния от изолирующего фланца до середины длины трубы, давая возможность определить поле температур воздуха внутри трубы.

Для определения температуры стенки трубы снаружи к ней прикреплялась термопара. Нагреватель включали в электрическую цепь через лабораторный автотрансформатор, дающий возможность изменять мощность и температуру нагревателя. Для контроля потребляемой мощности проводили замеры напряжения, подаваемого на нагреватель (при фиксированном

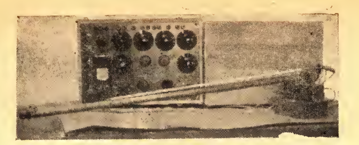


Рис. 35. Инфракрасный нагреватель

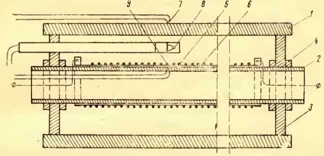


Рис. 36. Схема нагревателя и его установки внутри асбестоцементной трубы

1 — асбестоцементная труба; *2* — металлическая труба (корпус нагревателя); *3* — изолирующий фланец; *4* — стопорная гайка; *5* — нихромовый нагреватель; *6* — наолящня микаинт; *7* — термопара, измеряющая температуру стенки трубы; *8* — передвижная термопара для замера температуры воздуха; *9* — термопара для замера температуры нагревателя

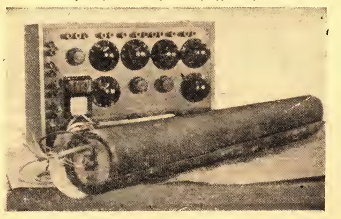


Рис. 37. Инфракрасный прогрев асбестоцементной трубы

электрическом сопротивлении). Измерение осуществлялось с помощью пирометрического милливольтметра МПП (класс I), градуированного 6°C, а изменение температуры стенки трубы и температуры воздуха внутри трубы — по потенциометрической схеме с помощью универсального переносного измерительного прибора УПИП-60. Для защиты термопары, измеряющей температуру воздуха внутри трубы, от воздействия лучистого тепла королек спая защищался экраном.

При изучении влияния лучистого (инфракрасного) обогрева на твердение асбестоцементных труб проводили сравнительные испытания на раздавливание прогретых и непрогретых (контрольных) образцов труб длиной 20 см.

Как для контрольных, так и экспериментальных образцов определяли и фиксировали: влажность смеси, объемную массу высушенного образца и водонасыщение.

Сырьем для приготовления труб, подвергавшихся инфракрасному обогреву, служил асбест П-5-65 (13%) и портландцемент Воскресенского цементного завода с удельной поверхностью 3700 $см^2/г$. Состав смеси (кроме двух первых опытов) оставался постоянным.

Полученные способом экструзии асбестоцементные трубы укладывали на металлический лоток и подвергали воздействию лучистого тепла в течение 10—120 мин при различных мощностях нагревателя.

Установка нагревателя внутри трубы и температурный контроль занимали не более 10 мин.

Прогретые образцы после снятия электрического напряжения освобождали от нагревателя и оставляли на воздухе в течение суток, после чего их помещали в бассейн с водой комнатной температуры. Одновременно с изготовлением опытного (обогреваемого) образца изготавливали 1—2 контрольных образца трубы, которые также укладывали на металлические лотки и оставляли на них в течение 1 суток, после чего помещали в водный бассейн комнатной температуры. В двух опытах прогретые образцы помещали в водный бассейн непосредственно после прекращения обогрева.

Водное твердение труб продолжалось в течение 13 суток, после чего трубы вынимали из бассейна, разрезали на кольца длиной 200 мм, которые испытывали

на раздавливание (через 14 и 28 суток после изготовления).

Начиная с опыта № 9, прогретые образцы и одну из контрольных труб (K_I) помещали в бассейн лишь на 1 сутки, в то время как второй контрольный образец находился в воде 13 сут.

Это было сделано с целью дополнительного выяснения влияния продолжительности водного твердения на прочность труб.

Результаты опытов приведены в табл. 29 и на рис. 38—42. По данным этой таблицы построены графики изменения температуры стенки трубы, воздуха (на расстоянии 30 см от торца) внутри трубы и нагревателя. Графически определены скорости подъема температуры стенки трубы (V), воздуха ($V_в$) и нагревателя ($V_н$).

Анализ полученных данных показал, что скорость подъема температуры нагревателя опережает скорость подъема температуры воздуха, которая в свою очередь опережает скорость подъема температуры стенки трубы.

Для нагревателя, использовавшегося в наших опытах, получены эмпирические уравнения, позволившие задавать требуемый температурный режим.

Максимальная температура нагревателя ($t_{нагр}^{макс}$) подчиняется уравнению:

$$t_{нагр}^{макс} = 1,39\,U + 96\ °C, \qquad (46)$$

где U — напряжение электрического тока.

Среднее значение скорости подъема температуры нагревателя ($V_н$ °C мин) пропорционально электрической мощности нагревателя и описывается уравнением:

$$V_н = 10\,l \cdot 1,15\,N, \qquad (47)$$

где N — электрическая мощность нагревателя (кВт); l — основание натуральных логарнфмов.

Скорость подъема температуры воздуха в трубе ($V_в$°С/мин) описывается уравнением

$$V_в = 0,08\,U - 6,7, \qquad (48)$$

где U — напряжение тока в В.

И, наконец, среднее значение скорости подъема температуры наружной стенки трубы ($V_{ст}$, °С/мин) описывается уравнением

$$V_{ст} = 0,0266\,U - 1,48. \qquad (49)$$

Таблица 29. Результаты опытов по лучистому обогреву асбестоцементных труб, получаемых методом экструзии

№№ опытов	Время прогревания в мин	Напряжение в В	Максимальная температура нагревателя в °С	Конечная влажность смеси в %	Средняя прочность при раздавливании в Па				$\frac{R_{луч}}{R_к}$	
					контрольный образец K		прогретый образец			
					через 14 сут	через 28 сут	через 14 сут	через 28 сут	через 14 сут	через 28 сут
1	60	—	340	27,8	$200\cdot10^5$	—	$177\cdot10^5$	—	0,885	—
2	120	—	220	24,8	$196\cdot10^5$	—	$158\cdot10^5$	—	0,807	—
3	30	230	350	17,9	$230\cdot10^5$	—	$271\cdot10^5$	—	1,178	—
4	15	230	410	23,9	$205\cdot10^5$	$176\ 5\cdot10^5$	$210\cdot10^5$	$194{,}5\cdot10^5$	1,022	1,1
5	10	230	390	24	—	$147\cdot10^5$	$167\cdot10^5$	$181{,}5\cdot10^5$	—	1,234
6	15	230	410	24	—	$147\cdot10^5$	$150\cdot10^5$	$164\cdot10^5$	—	1,117
9	10	230	440	22,6	$K_1=227\cdot10^5$	$228\cdot10^5$	$237\cdot10^5$	$250\cdot10^5$	1,04	1,045
					$K_2=207\cdot10^5$	$251{,}5\cdot10^5$			1,145	0,995
10	120	115	275	22,6	$K_1=227{,}5\cdot10^5$	$228\cdot\cdot10^5$	—		0,909	1,03
					$K_2=207\cdot10^5$	$251{,}5\cdot10^5$	$206{,}5\cdot10^5$	$235\cdot10^5$	0,998	0,936
11	15	230	400	23,4	$K_1=267{,}5\cdot10^5$	$216{,}5\cdot10^5$	$254\cdot10^5$	$256\cdot10^5$	0,95	1,181
					$K_2=219\cdot10^5$	$218\cdot10^5$			1,16	1,172
12	120	115	230	23,4	$K_1=267{,}5\cdot10^5$	$216{,}5\cdot10^5$	$242\cdot10^5$	$219{,}5\cdot10^5$	0,905	1,013
					$K_2=219\cdot10^5$	$218\cdot10^5$			1,104	1,006
13	30	230	440	22,7	$K_1=213\cdot10^5$	$221\cdot10^5$	$220{,}5\cdot10^5$	$197{,}5\cdot10^5$	1,034	0,893
					$K_2=235\cdot10^5$	$222\cdot10^5$			0,938	0,89
14	60	172	340	22,7	$K_1=213\cdot10^5$	$221\cdot10^5$	$271{,}5\cdot10^5$	$218\cdot10^5$	1,273	0,987
					$K_2=235\cdot10^5$	$222\cdot10^5$			1,153	0,983
15	20	230	440	19,7	$K_1=191{,}5\cdot10^5$	$220\cdot10^5$	$208{,}5\cdot10^5$	$220\cdot10^5$	1,088	1
					$K_2=181{,}5\cdot10^5$	$234{,}5\cdot10^5$			1,148	0,918
16	60	172	340	19,7	$K_1=191{,}5\cdot10^5$	$220\cdot10^5$	$193\cdot10^5$	$223\cdot10^5$	1,006	1,013
					$K_2=181{,}5\cdot10^5$	$234{,}5\cdot10^5$			1,062	0,932

Первые же опыты по лучистому обогреву асбестоцементных труб показали, что в процессе длительного нагрева (60—120 мин) теряется много влаги, испаряющейся из стенок трубы. «Парение», наблюдаемое визуально, начинается через 8—20 мин в зависимости от скорости подъема температуры. Потеря влаги асбестоцементом в начале твердения может привести к необ-

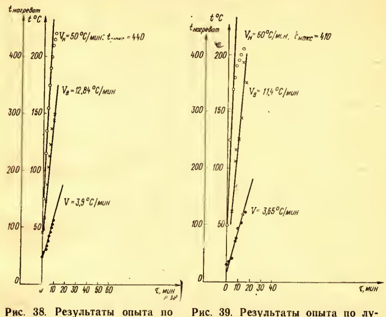


Рис. 38. Результаты опыта по лучистому прогреву асбестоцементной трубы в течение 10 мин

● — температура стенки; О — температура нагревателя; x — температура воздуха

Рис. 39. Результаты опыта по лучистому прогреву асбестоцементной трубы в течение 15 мин

Обозначения те же, что и на рис. 39

ратимым потерям прочности. Поэтому исследование было направлено как по пути использования умеренных тепловых нагрузок в течение более длительного времени (60—120 мин), так и по пути коротких по времени, но сильных по тепловому воздействию. При максимальной мощности нагревателя прогрев продолжался от 10 до 30 мин. Каждый из опытов дублировался. В ряде случаев через 10—15 мин прогрева трубу удавалось снять с лотка и уложить на поверхность. Сохранение

приобретенной формы гарантировалось во всех случаях после прогрева указанной продолжительности.

Однако прочность труб непосредственно после прогрева оказывалась еще недостаточной для укладывания их в многоярусные штабеля (допустима только одноярусная укладка труб на пол).

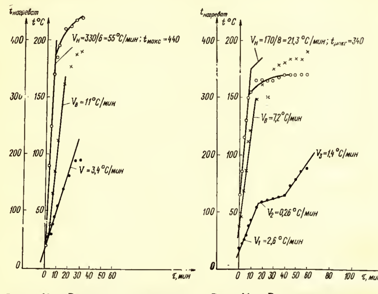


Рис. 40. Результаты опыта по лучистому прогреву асбестоцементной трубы в течение 30 мин
● — температура стенки; × — температура воздуха, измеряемая на расстоянии 60 см от края

Рис. 41. Результаты опыта по лучистому прогреву асбестоцементной трубы в течение 60 мин
● — температура стенки; ○ — температура нагревателя; × — температура воздуха

В опытах № 10 и 14 (см. табл. 29) трубы непосредственно после окончания прогрева в течение 120 мин (опыт 10) и 60 мин (опыт 14) были помещены в водный бассейн на 1 сутки. Результаты испытаний этих образцов показывают, что такая технология твердения может быть использована в дальнейшем.

В случае продолжительного прогрева труб (60—120 мин), когда температура нагревателя после достижения максимального значения остается постоянной, на графиках зависимостей температуры воздуха и стенки трубы от времени отмечаются перегибы, т. е. изменя-

ется скорость роста температуры. Для этих кривых можно выделить три участка с различными скоростями тепла экзотермии в процессе разогрева стенки трубы и воздуха, а также замедлением испарения воды из стенки трубы по мере гидратации вяжущего и уменьшения количества капиллярной влаги, особенно в крупных капиллярах.

К 15 мин в основном заканчивается рост температуры нагревателя, что тотчас же сказывается на замедлении роста температуры воздуха и стенки трубы. Замедленный рост температуры стенки трубы и воздуха продолжается до 60 мин прогрева, после чего начинается увеличение скорости роста температуры стенки трубы ($\sim$ в 5 раз), которому способствует, по-видимому, активный процесс гидратации цемента.

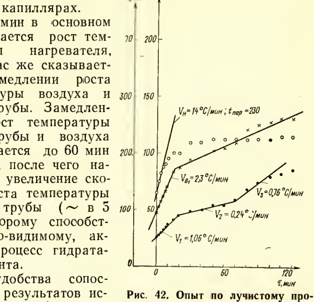


Рис. 42. Опыт по лучистому прогреву асбестоцементной трубы в течение 120 мин

Обозначения те же, что и на рис. 4_

Для удобства сопоставления результатов исследования труб на раздавливание было использовано отношение $R_{луч}$ (прогретые трубы) к $R_к$ (контрольные образцы) (табл. 29). Поскольку, начиная с опыта № 9, контрольных образцов было два (K_1 и K_2) с различными сроками водного твердения, были сопоставлены полученные результатами с обоими контрольными образцами.

Если отношение $\frac{R_{луч}}{R_к}$ больше единицы, то лучистый обогрев труб дает положительный эффект при твердении, если же это отношение меньше единицы, то влияние прогрева отрицательно. В сводной таблице приведены эти отношения как после 14-суточного, так и после 28-суточного хранения образцов. Как видно из этих результатов, трубы, подвергнутые инфракрасно-

му обогреву, обладают прочностью, как правило, не меньшей по сравнению с контрольными образцами.

Дальнейшая работа по инфракрасному обогреву должна идти по пути применения коротких интенсивных обогревов с 1—1,5-часовой выдержкой на воздухе и последующим водным твердением. Длительное же воздействие высокой температуры приводит к большим потерям влаги до начала интенсивной гидратации, которые с трудом компенсируются при дальнейшем водном твердении.

Исследование кинетики гидратации экструзионного асбестоцемента, подвергнутого лучистому прогреву, проводилось с помощью рентгенографического метода с использованием рентгеновского дифрактометра УРС-50И. Измерялась интенсивность дифракционных пиков C_3S ($d=1{,}76$ Å) и C_3A (межплоскостное расстояние $d=2{,}70$ Å). В качестве контрольного образца, в котором устанавливалась величина U использовалась асбестоцементная композиция того же состава, подвергнутая гидратации в мешалке в течение 10 мин.

Так как ожидаемые степени гидратации были сравнительно невелики, а интенсивности I и I_0 близки, то для снижения погрешности определения величины степени гидратации измерения интенсивности выполнялись 15—20 раз с перенабивкой образца.

Опытные образцы одной серии подвергали твердению без прогрева в течение 45 и 120 мин после формования изделия в экструзионном прессе, а образцы другой серии — инфракрасному прогреву в течение 45 и 120 мин. Результаты измерений представлены в табл. 30.

Как следует из приведенных в табл. 30 данных, в результате прогрева существенно увеличивается степень гидратации клинкерных минералов. Дополнительным подтверждением является величина интенсивности дифракционного пика $Ca(OH)_2$ ($d=4{,}92$ Å). Дифракционный пик $Ca(OH)_2$ отчетливо наблюдается только на рентгенограммах образцов, подвергнутых инфракрасному прогреву экструзионных асбестоцементных труб.

Результаты выполненных исследований позволяют отметить, что инфракрасный обогрев может быть применен как средство ускорения предварительного твердения асбестоцементных труб. Применение инфракрас-

Таблица 30. Степень гидратации минералов портландцемента в зависимости от режима предварительного твердения труб, полученных экструзионным способом

Режимы твердения	C_3S		C_3A		Интенсивность дифракционного пика $Ca(OH)_2$ в имп/с
	интенсивность в имп/с	степень гидратации в %	интенсивность в имп/с	степень гидратации в %	
Исходная асбестоцементная смесь	370	0	150	0	0
45 мин твердения, без подогревания	350	7	140	9,5	0
Инфракрасное прогревание в течение 45 мин	330	11	120	20	35
120 мин твердения, без подогревания	340	7,5	130	11	0
Инфракрасное прогревание в течение 120 мин	320	15	1[illegible]0	33	87

ного обогрева позволяет существенно (до 1—1,5 ч) сократить время пребывания труб на конвейерах (логках), предназначенных для сохранения их формы, после чего трубы могут быть уложены на плоскую поверхность. Положительное влияние инфракрасного прогрева объясняется интенсификацией процесса гидратации клинкерных минералов при повышенной температуре.

Пластифицирующий эффект, проявляющийся по мере увеличения продолжительности перемешивания асбестоцементной массы, может быть объяснен процессом гидратации в указанный период клинкерных минералов и прежде всего алюминатов и алюмоферритов кальция.

Для улучшения процесса экструзии и повышения качества асбестоцементных изделий предпочтительно использовать портландцементы с повышенной дисперсностью (не менее 4000—4500 см²/г).

Для обеспечения повышенной механической прочности готовых изделий наиболее целесообразным режимом твердения с точки зрения реальных условий производства является пропаривание изделий и их последующее кратковременное водонасыщение в течение 1,5—2 ч.

Одним из способов существенного ускорения процесса предварительного твердения асбестоцементных труб, получаемых способом экструзии, является инфракрасный прогрев, ускоряющий процесс гидратации клинкерных минералов в ранние сроки.

ГЛАВА V

ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Экструзионная технология производства асбестоцементных изделий может создаваться на основе двух схем подготовки асбестоцементной массы.

Обе эти схемы должны обеспечить подготовку асбестоцементной массы, пригодную для экструзии.

Первая схема предусматривает полусухой способ подготовки асбестоцементной массы. Отдозированная порция асбеста подвергается обмятию в бегунах, а затем сухой распушке в дезинтеграторе. Распушенный асбест и отдозированная порция цемента тщательно смешиваются, увлажняются до заданной влажности и снова тщательно перемешиваются для получения достаточно однородной асбестоцементной массы. В случае необходимости в асбестоцементную массу может вводиться пластифицирующая добавка. Подготовленная асбестоцементная масса подается в питатель экструдера, в котором формуются асбестоцементные изделия. По выходе из экструдера изделие подвергается обрезке, а затем твердению (предварительному и окончательному).

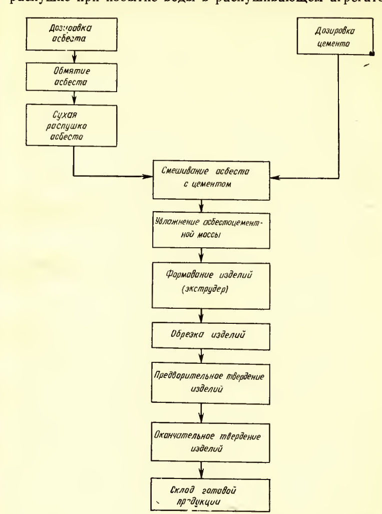
По такой схеме приготовления асбестоцементной массы осуществлялся основной эксперимент, результаты которого описаны выше.

Эта схема приготовления асбестоцементной массы легла в основу разработанного в НИИАсбестцементе проекта экспериментальной технологической линии изготовления асбестоцементных безнапорных труб способом экструзии.

По второй схеме предусматривается мокрый способ подготовки асбестоцементной массы. По этому способу

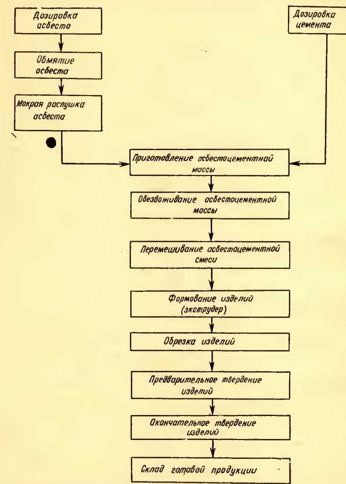
асбестоцементную массу приготовляют так же, как массу предназначенную для формования изделий на круглосеточных машинах.

Асбест подвергается обминанию в бегунах, затем распушке при избытке воды в распушивающем агрегате



(голлендере или гидропушителе). Далее в голлендере или турбосмесителе распушенный асбест тщательно смешивается с цементом. Следующей основной операцией

является обезвоживание полученной асбестоцементной массы до влажности, при которой можно подвергать ее экструдированию. В качестве аппаратов, в которых возможно обезвоживание, могут быть использованы фильтр-прессы, центрифуги, а также круглосеточные машины [17]. Обезвоженная таким образом масса подвергается



дополнительному перемешиванию, после чего поступает в экструдер для формования. Дальнейший технологический процесс не отличается от процесса по описанной выше схеме производства.

Такая технологическая схема подготовки асбестоцементной массы позволяет более полно использовать армирующие свойства асбеста, поскольку он подвергается достаточно полной распушке. Однако одновременно она требует включения в технологическую линию дополнительных агрегатов, роль которых состоит в обезвоживании асбестоцементной суспензии и перемешивании массы перед ее экструдированием.

Возможность изготовления асбестоцементных изделий способом экструзии с применением второй схемы подготовки асбестоцементой массы была проверена в условиях Белгородского комбината асбестоцементных изделий.

Известно, что при изготовлении на круглосеточных листоформовочных машинах листовых изделий производится обрезка свежесформованных листов. Полученные обрезки поступают в обрезомешалку и далее в виде суспензии возвращаются в ковшовую мешалку. При этом хотя возврат обрезков листов и сказывается на снижении качества готовой продукции, однако их использование является обязательным, поскольку они содержат от 5 до 7% сырья, используемого в производстве.

Было предложено использовать указанные обрезки асбестоцементных листов, получаемых по традиционной технологии, для изготовления способом экструзии безнапорных труб.

Схема опытного производства состояла в следующем. Обрезки листов поступали на транспортер и с его помощью загружались в специальные мешалки, в которых перерабатывались в течение 7—10 мин. Подготовленную асбестоцементную массу загружали в экструдер, из которого она в виде сформованной трубы выходила на приемный лоток (рис. 43). С последнего трубы укладывались на поддоны, на которых они твердели в течение 24 ч, а затем выдерживали в горячей воде также 24 ч.

После предварительного твердения производилась обрезка труб на специально сконструированном станке, а затем трубы укладывали в штабель на складе (рис. 44), где они находились в течение 12—14 суток после изготовления. После испытаний трубы отгружали потребителю и укладывали в опытные участки для прокладки телефонного кабеля (рис. 45).

Трубы изготавливали из обрезков листов типа ВО с использованием в смеске 50% асбеста П-5-65 и 50% ас-

беста М-6-40. Полученные трубы имели предел прочности при раздавливании 120—140·10^5 Па и среднюю плотность 1600 кг/м³.

Опыт работы на Белгородском комбинате показал возможность получения способом экструзии безнапорных асбестоцементных труб, используя для этой цели в качестве сырья обрезки сформованных листов. Кроме того, была подтверждена возможность формования экструзи-

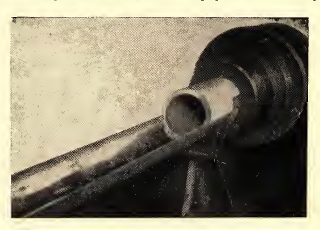


Рис. 43. Формование асбестоцементных безнапорных экструзионных труб из обрезков листов

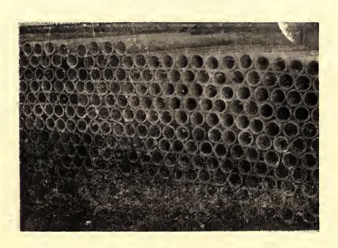


Рис. 44. Экструзионные трубы на складе готовой продукции

ей асбестоцементных труб без применения пластифицирующих веществ, что явилось результатом применения предложенного способа и оборудования.

Выполненные и изложенные в настоящей книге результаты исследований и экспериментальных работ по созданию экструзионной технологии изготовления асбес-

Рис. 45. Опытный участок прокладки телефонного кабеля с использованием экструзионных асбестоцементных труб

тоцементных труб были использованы при проектировании экспериментальной технологической линии.

Схема экспериментальной линии для производства безнапорных асбестоцементных труб способом экструзии, разработанной в институте НИИАсбестцемент, представлена на рис. 46.

Линия предназначена для осуществления непрерывного процесса производства асбестоцементных труб внутренним диаметром 100 мм с толщиной стенки 8—10 мм. Работа линии автоматизирована, управление ею производится оператором с пульта. Производительность линии 150—180 пог. м в ч труб длиной до 3000 мм. Общее время твердения труб на линии 8 ч. В том числе 3 ч на желобчатом конвейере и 5 ч на роликовом конвейере. Установленная мощность двигателей 33,5 кВт.

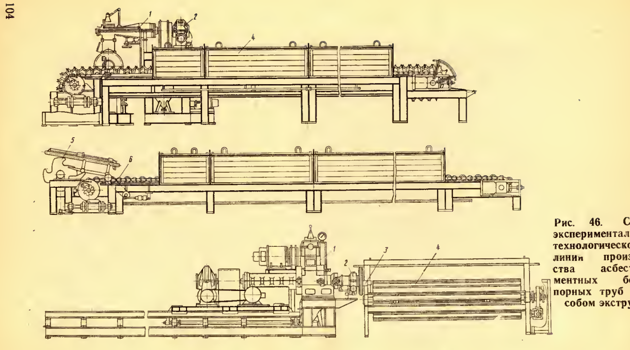


Рис. 46. Схема экспериментальной технологической линии производства асбестоцементных безнапорных труб способом экструзии

Габаритные размеры линии (без заготовительного отделения) в мм:

длина	49460
шнрнна	9920
высота	1626

Линия состоит из вакуум-пресса *1*, режущего механизма *2*, промежуточного поддерживающего желоба *3*, установки предварительного твердения желобчатого конвейера *4*, перекладчика труб *5*, установки твердения роликового конвейера *6*, гидросистемы и системы автоматического управления.

Асбестоцементная масса подается из заготовительного отделения в вакуум-камеру пресса, в которой посредством водокольцевого вакуум-насосного агрегата ВК-4 поддерживается вакуум порядка 700 мм рт. ст. При входе в вакуум-камеру масса дробится вращающимся ножом на мелкие гранулы, что облегчает эвакуацию воздуха из нее. Масса падает на ворошители, которые обеспечивают ее поступление в шнек пресса. Шнек пресса транспортирует массу от вакуум-камеры, к соплу сжимая ее до давления в $50 \cdot 10^5$ Па и выдавливая через сопло в виде трубы, которая поддерживается промежуточным желобом и поступает в желоб установки предварительного твердения.

После выдачи трубы установленной длины ее передний край нажимает на поворотный стержень конечного выключателя, чем дается команда на включение электромагнитной муфты механизма резки.

Механизм резки делает один оборот (расчетное время срабатывания механизма — 1 с), прорезает трубу ножами и после возвращения в исходное положение выключается посредством конечного выключателя (обеспечивающего выключение электромагнитной муфты).

Прорезанная ножами труба продолжает двигаться по желобу до тех пор, пока ее передний край нажмет на второй конечный выключатель, чем дается команда на смену желобов, которая осуществляется следующими операциями: гидроцилиндр отводит желоб со свежесформованной трубой от вакуум-пресса и ставит его в один ряд со всеми остальными желобами установки предварительного твердения. В конце хода гидроцилиндра срабатывает реле давления, чем дается команда на включение гидропривода установки предварительного

твердения, который посредством храпового механизма продвигает установку на один шаг, при этом желоб со свежесформованной трубой своим роликом попадает в направляющую раму установки, а свободный желоб своим роликом — в вилку гидроцилиндра. В конце хода гидроцилиндра привода установки срабатывает конечный выключатель, который подает команду гидроцилиндру на обратный (холостой) ход и гидроцилиндру, посредством которого свободный желоб подается к экструдеру для принятия очередной трубы.

Во время операций смены желобов формуемая труба поддерживается промежуточным желобом, служащим одновременно и фиксатором для сменных желобов установки предварительного твердения (желобчатый конвейер).

Желобчатый конвейер двигается в камере, в которой создается паровоздушная среда с температурой 50—60°С при относительной влажности не менее 80%, чем ускоряется процесс твердения. За это время трубы набирают прочность, достаточную для их перекладки в два ряда на установку твердения (роликовый конвейер).

Операция перекладки осуществляется перекладчиком, состоящим из кантователя и укладчика. Труба из желоба установки предварительного твердения попадает на пандус и, скатываясь по нему, нажимает на конечный выключатель, который дает импульс на счетчик количества выработанных линией труб и на включение электродвигателя привода кантователя. После пандуса труба попадает в захваты непрерывно вращающегося кантователя, который передает ее на укладчик, представляющий собой также пандус, но закрепленный на качающейся раме.

Качание нижней части укладчика осуществляется посредством кривошипов, приводимых в движение гидроцилиндром через рычаг и цепные передачи.

Верхняя часть укладчика движется на роликах по направляющим. Благодаря этому осуществляется укладка вырабатываемых труб на установку твердения в два ряда. Во избежание сильных ударов труб при укладке над пандусом укладчика расположен гидроцилиндр сопровождения, который своими резиновыми упорами придерживает трубу, не давая ей набрать чрезмерно большую скорость.

Установка твердения труб представляет собой роли-

ковый конвейер шагового перемещения с таким же гидроприводом, как и установка предварительного твердения. Так как на эту установку трубы укладываются в два ряда, то его гидропривод осуществляет одно перемещение на два перемещения гидропривода установки предварительного твердения.

Установка твердения, на которой трубы находятся в течение 5 ч, также закрыта тоннелем, в котором для ускорения процесса твердения создается паровоздушная среда с температурой 50—60°С при относительной влажности не менее 80%.

После прохождения предварительного твердения трубы передаются на складское хранение или на другие технологические операции, например автоклавирование при использовании песчанистого портландцемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аморян А. С. О трении и боковом давлении торфа малой степени разложения. Труды, вып. 12, 1963.

2. Арго Ю. А. Основные прочностные и деформативные свойства асбестоцемента при поперечном изгибе и одноосном растяжении и сжатии. Труды НИИАсбестцемента, вып. 16, 1963.

3. Байков А. А. Гидравлические цементы и гидравлические добавки, их состав, твердение и разрушение в природных условиях. Собрание трудов, т. V, АН СССР, 1948.

4. Беркович Т. М. и др. Производство асбестоцементных изделий. М., Госстройиздат, 1962.

5. Беркович Т. М., Комаров В. А. Формование крупноразмерных асбестоцементных листов из концентрированных суспензий. М., Стройиздат, 1969.

6. Беркович Т. М. Влияние технологических факторов на деформативные свойства асбестоцемента для строительных конструкций. «Строительные материалы», 1960, № 4.

7. Беркович Т. М., Новикова Д. А. Технологические свойства портландцементов в производстве асбестоцементных изделий. Труды ВНИИАсбестцемента, вып. 8, 1958.

8. Беркович Т. М. Труды НИИАсбестцемента, вып. 15, 1962.

9. Беркович Т. М. Комбинированная гидротермальная обработка асбестоцементных изделий. М., Стройиздат, 1967.

10. Беркович Т. М. и др. Интенсификация процесса твердения асбестоцементных листов на портландцементе путем дополнительного кратковременного увлажнения полуфабриката. Труды НИИАсбестцемента, вып. 15, 1962.

11. Беркович И. И. Исследование внешнего трения торфа и фактической площади контакта применительно к процессам прессования. Диссертация. Калинин, 1966.

12. Беркович И. И. и др. Исследование трения верхнего торфа. «Горный журнал». Из-во вузов, 1966, № 8.

13. Берней И. И. Формование асбестоцементных листов. М., Стройиздат, 1969.

14. Берней И. И. Прочность и морозостойкость асбестоцементных листов в зависимости от их объемного веса. «Строительные материалы», 1962, № 2.

15. Береснев Б. И., Верещагин А. Ф., Рябинский Ю. Н. О выдавливании металлов жидкостью, находящейся под высоким давлением. Известия АН СССР. Отделение технических наук. «Механика и машиностроение», 1959, № 1.

16. Блох Г. С., Литвинов А. Н. Асбестоцементные материалы и конструкции и их эксплуатационные качества. М., Госстройиздат, 1964.

17. Боязный Л. С., Волчек И. З. Авторское свидетельство № 338390, 1972.
18. Булавин И. А. Оборудование керамических и огнеупорных заводов. М., Госстройиздат, 1965.
19. Ветров Ю. А. Трение между ножом и грунтом в процессе резания. Научн. докл. Высшей школы. «Строительство», 1958, № 2.
20. Воеводский В. А. Механическое оборудование для производства асбестоцементных изделий. М., «Машиностроение», 1960.
21. Волков О. С., Соколов П. Н. Кинетика гидратации портландцемента и влияние на нее добавки асбеста. Труды НИИАсбестцемента, вып. 22, 1968.
22. Волчек И. З., Круня З. Ф. Влияние усилий прессования полусухих асбестоцементных смесей на физико-механические свойства листовых изделий. НИИАсбестцемент. Труды, вып. 19, М., Госстройиздат, 1964.
23. Волчек И. З., Круня З. Ф. Интенсификация процесса твердения и улучшение свойств асбестоцемента, получаемого из полусухих смесей. НИИАсбестцемент. Труды, вып. 20, М., 1965.
24. Волчек И. З. Авторское свидетельство СССР № 774925, 1965.
25. Волчек И. З., Валюков Э. А., Подкорытов В. П. Авторское свидетельство № 1248617, 1968.
26. Волчек И. З., Лукошкина Л. А. Об использовании минеральной ваты в производстве листовых асбестоцементных изделий. Техинформация ЦНИИТЭСТРОМ. М., 1965.
27. Волчек И. З. Оценка процессов твердения ячеистых бетонов до автоклавной обработки с помощью реологических характеристик. НИИЖБ. Сб. трудов № 8, М., 1958.
28. Волчек И. З., Данилина Т. И. и др. Производство асбестоцементных труб автоклавным способом. «Строительные материалы», 1966, № 3.
29. Волчек И. З., Данилина Т. И. Опыт освоения автоклавной технологии асбестоцементных труб на Акмянском заводе. Техинформация, ЦНИИТЭСТРОМ, 1967.
30. Волчек И. З., Валюков Э. А., Подкорытов В. П. Экструзионный способ изготовления асбестоцементных и других волокнистоцементных изделий. «Строительные материалы», 1968, № 7.
31. Гансен В. Третий международный конгресс по химии цемента. М., Госстройиздат, 1958.
32. Глухов Е. Е., Клаз С. И. Вопросы реологии в процессах переработки пластмасс в изделия. «Пластические массы», 1960, № 5.
33. Горяйнов К. Э., Волчек И. З., Уткин В. В. Авторское свидетельство № 89514, 1950.
34. ГОСТ 1839—48. Трубы и муфты асбестоцементые для безнапорных трубопроводов.
35. ГОСТ 6482—53. Трубы бетонные и железобетонные безнапорные.
36. ГОСТ 286—54. Трубы керамические канализационные.
37. Гук Г. Я. и др. Пластическое формование металлов. М., «Металлургия», 1968.
38. Гура Г. С. О приближенном расчете коэффициента трения скольжения твердых тел по грунту. «Вестник машиностроения», 1963, № 7.
39. Данилов Н. Н., Пермяков Ю. М. Разработка техноло-

гин возведения высотных сооружений в скользящей опалубке с применением инфракрасных лучей. МИСИ им. Куйбышева, М., 1965.
40. Дерягин Б. В. Что такое трение? Изд. АН СССР, 1962.
41. Журавлев В. Ф. Химия вяжущих веществ. Химиздат, 1951.
42. Зевин Л. С., Флацбаум И. М. Исследование преимущественной ориентировки асбеста в асбестоцементных материалах рентгенографическим методом. Труды НИИАсбестцемента, 1966, № 21.
43. Китаев Е. Н. Влияние условий производства на качество асбестоцементных листовых изделий. Труды НИИАсбестцемента, 1960, вып. 12.
44. Китаев Е. Н. О выборе цементов для производства асбестоцементных изделий высокого качества. Труды НИИАсбестцемента, 1962, вып. 14.
45. Комская М. С. Изучение движения глинистой массы в мундштуках ленточных прессов методом моделирования. Киев, Госстройиздат УССР, 1959.
46. Королев К. М. Производительность ленточного пресса при производстве пустотных керамических изделий. «Стекло и керамика», 1953, № 9.
47. Кравченко И. В. Глиноземистый цемент. М., Госстройиздат, 1961.
48. Крагельский И. В. Трение и износ. Машгиз, 1962.
49. Лукошкина Л. А., Давыдова Ф. Л. Влияние сорта и количества асбеста на физико-механические показатели асбестоцемента. Труды НИИАсбестцемента, вып. 2. М., Промстройиздат, 1951.
50. Малинин Ю. С., Лопатникова Л. Я., Гусева В. И., Клишанис Н. Д. К вопросу о гидратации и твердении портландцемента. Международная конференция РИЛЕМ. М., 1964.
51. Миронов С. А. Температурный фактор в твердении бетона. М., Госстройиздат, 1948.
52. Михалевская Е. С., Волков О. С., Буланова Л. П., Беркович Т. М. Влияние водоцементного фактора на кинетику гидратации цемента и асбестоцемента. Труды НИИАсбестоцемента, вып. 15, 1962.
53. Михайлов Н. В., Ребиндер П. А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем. «Коллоидный журнал», т. 17, вып. 1955.
54. Мороз П. С. Новые машины для прессования листовых асбестоцементных изделий. Институт информации Минстройдоркоммунмаш. Инф. сообщение № 1, 1967.
55. Мороз П. С., Нейфельд М. С. Новые машины для производства асбестоцементных коньковых деталей. «Строительные материалы», 1966, № 12.
56. Налимов В. В., Чернова А. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
57. Нечипоренко С. П. К теории обработки пластичных керамических масс. Из-во АН УССР, Киев, 1959.
58. Николаев К. Н., Боровков И. А. Экспериментальное определение коэффициентов трения асбестоцементных смесей. Труды ВНИИСтроммаш, № 6, 1966.
59. Николаев К. Н. Исследование процесса уплотнения асбестоцементных смесей при полусухом формовании. НИИСтроммаш, сб. НТИ № 2, 1961.

60. Носенко Н. Е., Гершкович Б. Н. Экструзионный агрегат для получения погонажных изделий. Авторское свидетельство № 80134, 1950.

61. Оборудование для производства строительных материалов. М., Машгиз, 1959.

62. Окороков С. Д. К вопросу о механизме «коллоидации» по А. А. Байкову при твердении и вяжущих веществ. Труды совещания по химии цемента. М., Промстройиздат, 1956.

63. Отливанчик А. Н. Производство и применение древесностружечных плнт. М., Госстройиздат, 1962.

64. Отлев И. А., Модлин Б. Д. Производство древесностружечных плит. М., «Высшая школа», 1966.

65. Пицкель Л. Н. Асбестоцементные лотковые плиты. М.—Л., Госстройиздат, 1952.

66. Пицкель Л. Н., Русина М. С. Об однородности асбестоцемента. «Строительные материалы», 1960, № 11.

67. Приходченко П. П. Оборудование для переработки пластических масс. «Строительные материалы», 1964, № 6.

68. Пузиков Ю. Д. Изобретатель и рационализатор, 1963, № 9, 1964, № 5, 1967, № 4.

69. Ратинов В. Б. и др. О механизме кристаллизации составляющих цементного камня. ДАН СССР, № 136, № 6, 1961.

70. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. М., «Знание», 1958.

71. Руднева Л. Н., Сотникова К. В. Выпуск большеразмерных асбестоцементных листов на автоматизированном оборудовании. «Строительные материалы», 1965, № 5.

72. Сапожников М. Я. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М., 1962.

73. Сатарин В. И., Акопян В. А. Асбестоцементная промышленность. Состояние и перспективы развития. М., Госстройиздат, 1961.

74. Сегалова Е. Е., Ребиндер П. А. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ. «Строительные материалы», 1960, № 1.

75. Сегалова Е. Е., Амелина Е. А., Ребиндер П. А. Роль величины пересыщения в формировании кристаллизационных структур твердения. «Коллондный журнал», т. XXV, № 2, 1963.

76. Сегалова Е. Е., Измаилова В. Н., Ребиндер П. А. ДАН СССР, т. 110, вып. 5, с. 808, 1956.

77. Силин В. А. Исследование и расчет вязкопластического течения глиняной массы в конических иасадках и мундштуках ленточных прессов. Труды НИИ местной и топливной промышленности, вып. 12, 1958.

78. Славина Т. М., Соколов П. Н. О влиянии минералогического состава и дисперсности цемента на физико-механические свойства и морозостойкость асбестоцемента. Труды НИИАсбестцемента, вып. 13, 1962.

79. Соколов П. Н. Технология асбестоцементных изделий. М., Стройиздат, 1968.

80. Стрелков М. И. Изменение истинного состава жидкой фазы, возникающей при твердении вяжущих веществ и механизм их твердения. Труды совещания по химии цемента. М., Промстройиздат, 1956.

81. Терцаги К. Теория механики грунтов. М., Госстройиздат, 1960.
82. Фадеева В. С. Оптимальная влажность для формования строительных изделий из пластических дисперсных масс. «Стекло и керамика», 1959, № 8.
83. Фадеева В. С. Формуемость пластических дисперсных масс. М., Госстройиздат, 1961.
84. Фельзенбаум В. Г. Асбестоцементная промышленность за рубежом. М., Госстройиздат, 1960.
85. Шейкин А. Е. Пути получения высокопрочных бетонов. «Бетон и железобетон», 1957, № 4.
86. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. Л., Госхимиздат, 1962.
87. Building Research т. 3, № 2, 111—IV, 1966.
88. Die Bauwistschaft 1969, Heft 24. 55.
89. Crün. W, Wiss Z. Hochschulle Archetecturing Barwesen, Weimer 6, 18, 1958—59.
90. Tarlin J. H. Australian Journ. of Appliedscince 10, № 3. 1959.
91. 19/X 1971.
92. Патент США 3.118.808 кл. 162—402.
93. Патент Англии 815372 кл. 87/2 1959.
94. Патент Италии 60027979 кл. В 28 с.
95. Патент США 2,144,213, 1939.
96. Патент США 2,344,959 1944.
97. Патент США 2,392,190 1946.
98. Патент Англии № 590040, 1947.
99. Патент США № 2434690, 1948.
100. Патент США № 3219467, 1965.
101. Патент Австралии № 257776, 1965.
102. Патент Англии № 922427, 1965.
103. Патент США, № 3271186, 1965.
104. Патент ФРГ № 1203173, 1965.
105. Патент Англии 1,121,803, 1968.
106. Патент Австрии 290.371, 1971.
107. Патент Японии 12436 22 с. 38.
108. Патент США 3,529,981, 1970.
109. Патент США 3,532,985, 1971.
110. Патент США 3,549,737, 1970.
111. Патент США, 3, 667, 977, 1972.
112. Проспект фирмы «Johns — Manville». США, 1970.
113. Проспект фирмы «Johns — Manville». США. Панели для торцовой облицовки зданий, произведенные методом А. С. Е.
114. Проспект фирмы «Johns — Manville». США. Новые материалы для облицовки зданий по кирпичной кладке.
115. Проспект фирмы «Eternit». А. С. Е. Амстердам, 1969.
116. Проспект фирмы «Universal Asbestos Manufacturing». Англия.
117. Проспект фирмы «Nadsovi» Япония.
118. Powers T. «Zement—Kalk—Gips», 1961, № 3.
119. Schwezer Baublott 1968, № 22.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИОСИФ ЗАЛМАНОВИЧ ВОЛЧЕК,
ЭДУАРД АЛЕКСЕЕВИЧ ВАЛЮКОВ

ПРОИЗВОДСТВО АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

Редакция литературы по технологии строительных материалов
Зав. редакцией З. К. Косякина

* * *

Редактор Н. М. Николаева
Мл. редактор Л. А. Табачник
Технические редакторы Т. В. Кузнецова, В. Д. Павлова
Оформление обложки художника А. А. Бекназарова
Корректоры В. А. Быкова, Л. П. Бирюкова

Сдано в набор 2.VII. 1974 г. Подписано к печати 20.I. 1975 г.
Т-02827 Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2.
5,88 усл. печ. л. (уч.-изд. 6,26 л.)
Тираж 2000 экз. Изд. № AVIII—4174 Зак. № 358 Цена 31 коп.

Стройиздат
103006, Москва, Каляевская 23,а

Подольская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, 25

Цена 31 коп.